

RECHERCHES INDUSTRIELLES

SUR LES

CHAUX, CIMENTS

ET

MORTIERS

PAR

J. BIED

INGÉNIEUR-CONSEIL
ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

PARIS



92, RUE BONAPARTE (VI)
1926



RECHERCHES INDUSTRIELLES

SUR LES

CHAUX, CIMENTS ET MORTIERS

T.

NOTE DE L'ÉDITEUR

La mort a frappé M. Bied avant qu'il ait pu terminer la mise au point de cet ouvrage. Son collaborateur M. Chaix a bien voulu se charger de ce travail, ainsi que de la lecture et de la correction des épreuves. Nous l'en remercions bien vivement.

RECHERCHES INDUSTRIELLES

SUR LES

CHAUX, CIMENTS

ET

MORTIERS

PAR

J. BIED
INGÉNIEUR-CONSEIL
ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

PARIS


92, RUE BONAPARTE (VI)
1926

AVANT-PROPOS

Quelques-uns de mes amis ont pensé que je devais publier les résultats que trente années de travail dans l'industrie des Chaux et Ciments, dont plus de vingt passées à la tête de l'important service du Laboratoire et des Recherches de la Société J. et A. Pavin de Lafarge, m'ont permis d'obtenir.

A vrai dire, une bonne partie de ces résultats ont déjà paru dans divers articles de Revues ou ont fait l'objet de communications à des Sociétés ou Congrès. Mais ils sont un peu épars et ils gagneraient à être rapprochés. D'autres de mes recherches sont complètement inédites.

J'ai donc pensé que le meilleur moyen de présenter mes travaux était de les grouper suivant leur nature.

C'est ce que j'ai fait, dans ce petit volume, en les classant de la façon suivante :

1° Recherches sur la constitution intime des calcaires et des argiles ;

2° Recherches sur la constitution intime des liants hydrauliques et leurs propriétés physiques et chimiques ;

3° Recherches sur les décompositions par les eaux sulfatées et moyens d'y remédier ;

4° Recherches sur la prise et le durcissement des ciments ;

5° Recherches sur certaines propriétés physiques des ciments ou mortiers mis en œuvre ;

6° Recherches sur les procédés d'essai des liants hydrauliques ;

7° Ciments alumineux.

J'ai fait de nombreuses citations de mes publications et j'ai introduit les plus importantes *in extenso*, ainsi que, en annexes, trois conférences faites aux Officiers du Génie de l'École d'Application en 1911-1912-1913.

Ces travaux n'ont pas la précision de travaux purement scientifiques. Les laboratoires industriels ne sont pas installés comme des laboratoires de Facultés. Le but qu'on y poursuit n'est pas le même. Peu nous importe, par exemple, de savoir que la déshydratation des silicates a lieu à 105, à 110 ou à 115° ; il nous suffit de savoir, pour diriger la fabrication, qu'elle est complète à 120°.

Aussi beaucoup d'entre eux mériteraient d'être contrôlés dans des laboratoires scientifiques et je serai enchanté de voir mes résultats complétés, discutés et précisés.

Si, cependant, tels qu'ils sont, ces travaux paraissent intéressants, je demande qu'on en reporte surtout l'honneur au Maître qui m'a toujours guidé de ses conseils affectueux, Monsieur Henry Le Chatelier, et aux Industriels qui ont généreusement mis à ma disposition les ressources nécessaires, Messieurs J. et A. Pavin de Lafarge.

Je désire aussi, en livrant ces recherches au public, rendre hommage à mon collaborateur, René Amic, mort courageusement à 33 ans, en commandant sa compagnie, le 21 septembre 1914 à Vigneulles-lès-Hattonchatel.

Sa vive intelligence, son amour de la recherche, sa précision dans les expériences, son caractère élevé m'ont, pendant sa trop courte présence auprès de moi, grandement aidé dans mes travaux.

Enfin, je prie mon collaborateur, M. Maurice Chaix, d'agréer l'hommage de ma gratitude pour avoir bien voulu trier et réunir tous mes documents.

CHAPITRE I

RECHERCHES SUR LA CONSTITUTION INTIME DES CALCAIRES ET DES ARGILES

CHAPITRE I

RECHERCHES SUR LA CONSTITUTION INTIME DES CALCAIRES ET DES ARGILES

On sait, depuis Vicat, que les calcaires qui fournissent après cuisson, de la chaux hydraulique ou du ciment, sont des mélanges naturels d'argile et de carbonate de chaux.

Un autre fait bien reconnu, depuis un certain nombre d'années, est que le dépôt argileux mélangé au carbonate de chaux n'est pas uniformément réparti.

C'est ainsi qu'un banc de pierres, d'*aspect très homogène*, donne cependant à l'analyse, lorsqu'on fait des prélèvements localisés, des proportions de résidu différentes, et que les différences constatées atteignent couramment 25 0/0 du poids de ces résidus.

En sorte que si l'on fait porter l'analyse sur 1 décimètre cube de pierre, broyé et mélangé, on pourra classer, comme très homogène un banc de pierres qui l'aurait paru, au contraire, très peu, si on avait fait les prélèvements pour analyses en des points déterminés, au moyen d'une mèche par exemple.

On met facilement en évidence, d'une façon grossière, cette inhomogénéité des calcaires argileux, en en attaquant la surface au moyen d'acide chlorhydrique dilué.

M. Leduc, alors qu'il était chef de section au laboratoire des Arts et Métiers, a fait paraître, à ce sujet, dans le *Bulletin des Arts et Métiers* (n° 10, 1907), une étude intéressante, accompagnée de nombreuses photographies.

Nous donnons (*fig.* 1) la reproduction d'une photographie prise dans la collection de notre laboratoire, où M. Leduc, comme il a bien voulu le reconnaître dans l'article précité, a puisé l'idée première de ses recherches.

Ce procédé, cependant, n'est pas à recommander. En effet, l'acide chlorhydrique, en attaquant le carbonate de chaux, laisse, en de nombreux points, un squelette très friable de silice et d'argile, qui est entraîné par le lavage, produisant ainsi des vides qui ne correspondent pas, cependant, à des emplacements de carbonate de chaux pur. Quant aux parties qui, au contraire, restent en relief, elles ne sont pas davantage constituées par les parties du calcaire qui n'auraient contenu que de la silice, mais ce sont, simplement, des endroits où le squelette argileux, étant plus argileux, a gardé

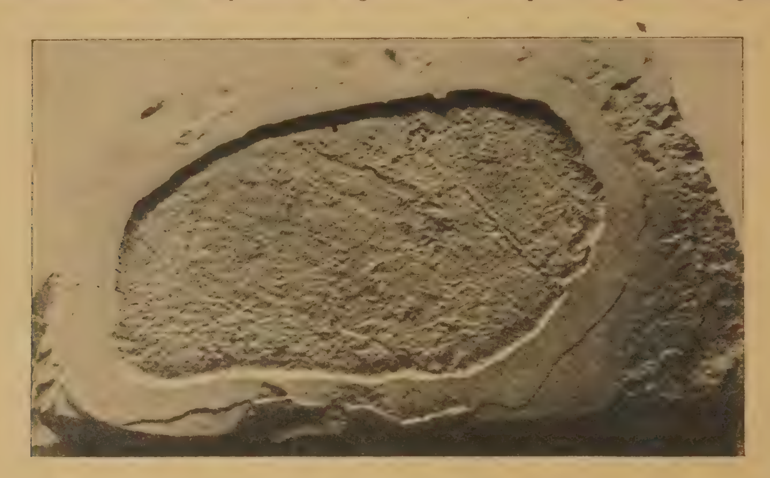


Fig. 1. — Calcaire simplement attaqué par l'acide chlorhydrique.

plus de cohésion, et où il est resté assez solide, après la disparition du carbonate de chaux, pour ne pas être entraîné au lavage.

On peut perfectionner ce procédé en donnant de la consistance au résidu argileux, de manière à n'enlever, après attaque par l'acide chlorhydrique, que le carbonate de chaux pur. On se borne ainsi à mettre en évidence les inclusions de carbonate de chaux. Le mode d'opérer est le suivant :

On détache du bloc de calcaire un fragment de la grosseur du poing ; on le dégrossit et on le façonne en prisme tabulaire à faces parallèles. Ces faces sont dressées sur un grès à aiguiser. On achève de polir l'une d'elles à la poudre d'émeri humide sur un disque en fonte, ou en bronze.

Le degré de polissage à atteindre est tel que l'on ne doit plus distinguer, à l'œil nu, les stries et les éraflures de la surface.

La tablette est alors lavée et séchée. Lorsqu'elle est bien sèche, on la plonge dans un bain de paraffine fondue, où, suivant la compacité du calcaire, on la laisse de dix minutes à une demi-heure, de façon à ce que la paraffine pénètre de quelques millimètres.

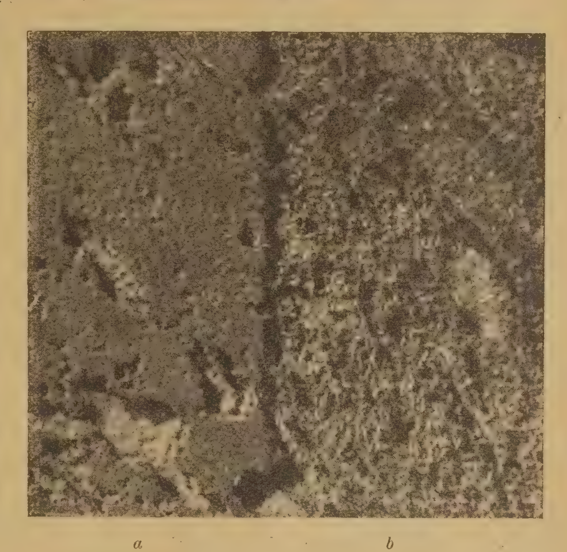
On la sort, on l'égoutte et laisse refroidir. On repasse alors la face polie sur le grès fin, ou sur du papier émeri, pour enlever la pellicule superficielle de paraffine qui retarderait trop l'attaque.

On plonge ensuite le bloc dans une solution d'acide chlorhydrique à 10 0/0, et on prolonge l'attaque aussi longtemps qu'il est nécessaire pour que la face polie se creuse de trous bien visibles.

La durée de l'attaque peut varier de cinq minutes à une demi-heure, suivant la dureté du calcaire.

Le bloc est finalement lavé et séché.

En opérant de cette façon, le squelette de silice mis à jour par la dissolution du carbonate de chaux dans l'acide, conserve la cohésion que lui communique la paraffine et met nettement en évidence les inclusions calcaires.



a b

Fig. 2. — Calcaire attaqué par l'acide chlorhydrique.
a) directement; b) après passage à la paraffine.

Les résultats obtenus sont intéressants, comme le montrent les photographies (*fig.* 2, 3, 4, 5).

J'ai voulu également essayer de profiter du fait signalé par M. Grandjean, ingénieur des Mines (*Revue de Métallurgie*, 3, 1910, p. 183)[1], pour essayer de rendre apparente la répartition du résidu insoluble, en polissant les calcaires et en les teintant soit au bleu de méthylène soit aux colorants organiques, dissous dans le xylol.

On pouvait, en effet, penser qu'après ce traitement leur colora-

[1] M. Grandjean a indiqué que le bleu de méthylène et les colorants organiques étaient fixés par le résidu argileux seul, et que les calcaires purs n'étaient pas colorés.

tion serait proportionnelle à la teneur en résidu insoluble, et que

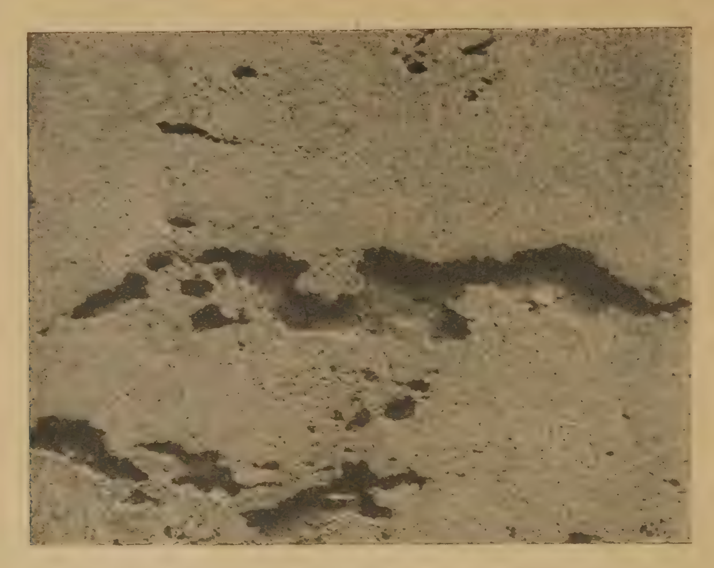


Fig. 3. — Attaque d'un calcaire préalablement paraffiné.

les variations d'apparence indiqueraient les proportions du résidu, en chaque point.

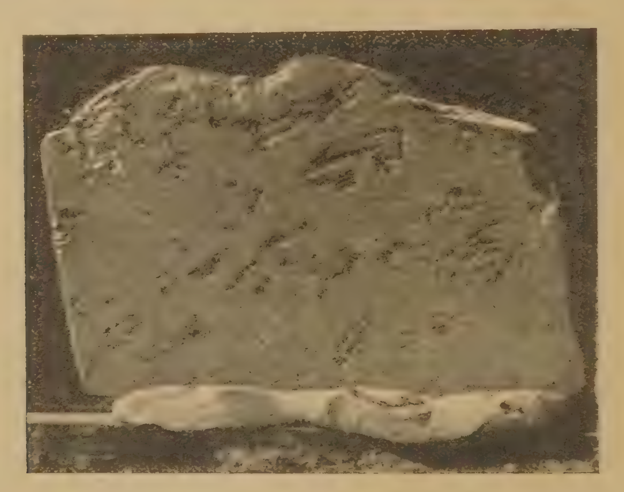


Fig. 4. — Attaque d'un calcaire préalablement paraffiné.

Malheureusement, cette méthode élégante donne lieu à de grosses difficultés. S'il est exact, d'abord, que les calcaires purs ne sont pas

colorés, cela n'est cependant rigoureusement vrai que s'ils ne sont pas poreux, la craie fixant les colorants. La porosité joue donc un rôle important.

La teinte initiale du calcaire, la présence de matières organiques ou bitumineuses, sont encore d'autres causes d'erreurs.

Enfin, les précautions plus ou moins minutieuses prises pendant les manipulations, comme le degré de concentration de la solution et le temps d'immersion, introduisent d'autres variables, et, après de nombreuses études, il a fallu renoncer à mettre au point ce procédé, qui peut bien rendre visible l'hétérogénéité d'un calcaire[1] (photographies, *fig.* 6, 7, 8), mais qui ne saurait servir à *comparer entre eux deux calcaires*, seule question intéressante pour l'industriel.



Fig. 5. — Attaque d'un calcaire préalablement paraffiné.

Résidus { en 1................ 21,91 0/0
en 2................ 16,52 0/0

La qualité des produits obtenus et la bonne marche de la cuisson dépendent, en effet, non seulement de l'analyse élémentaire et de la teneur moyenne en résidu argileux, mais aussi, et pour une part plus importante qu'on ne le pense, de la bonne répartition de ce résidu et de la grosseur des grains.

Que le mélange argile-carbonate de chaux soit uniforme, les combinaisons se feront complètement, rapidement et les résultats seront excellents. Que le mélange soit, au contraire, inhomogène, il faudra

(1) C'est ainsi que sur des calcaires polis et teintés par ce procédé, l'examen microscopique montre que le résidu s'agglomère souvent en rognons très petits, entourés d'une zone beaucoup plus calcaire, et d'apparence tout à fait analogue aux rognons de silice qu'on rencontre dans les carrières et qui, eux aussi, sont entourés de zones calcaires. (E. Nivoit, *Cours de Géologie*, 1898, p. 449).

élever la température, prolonger son action jusqu'à la fusion pâteuse, pour arriver à la combinaison de tous les éléments siliceux, et encore cette combinaison reste-t-elle toujours incomplète, comme l'indique la présence de beaucoup de poussières bicalciques, au bas des fours.

C'est ainsi que j'ai eu à étudier des calcaires à 12 0/0 de résidu uniquement siliceux, ayant par conséquent 4 0/0 de moins que la



Fig. 6. — Calcaire teinté par la méthode Grandjean.

quantité de silice théoriquement nécessaire à la saturation de la chaux, qui donnaient, cependant, malgré ce faible résidu, un ciment naturel dont il fallait, évidemment, supprimer le gonflement, mais d'excellente qualité.

Il était naturel, dans ces conditions, de penser qu'on pourrait avoir une idée de la valeur de pierres d'analyses semblables, en cherchant à déterminer la quantité de silice combinée à la chaux, à basse température.

Le procédé qui a donné, à notre laboratoire, les résultats les plus concordants, est le suivant :

On concasse, dans un mortier de porcelaine, une dizaine de grammes du calcaire à étudier, en s'appliquant à obtenir des grains

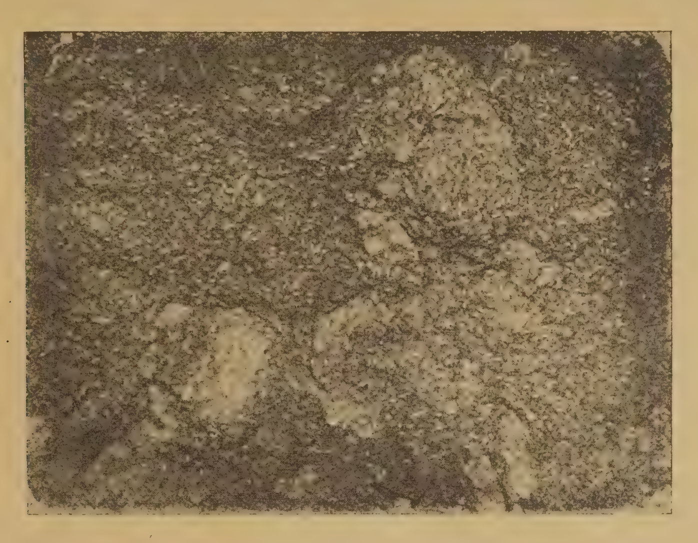


Fig. 7. — Calcaire teinté par la méthode Grandjean.

de 1 à 2 millimètres de diamètre, et le moins de poussière possible.

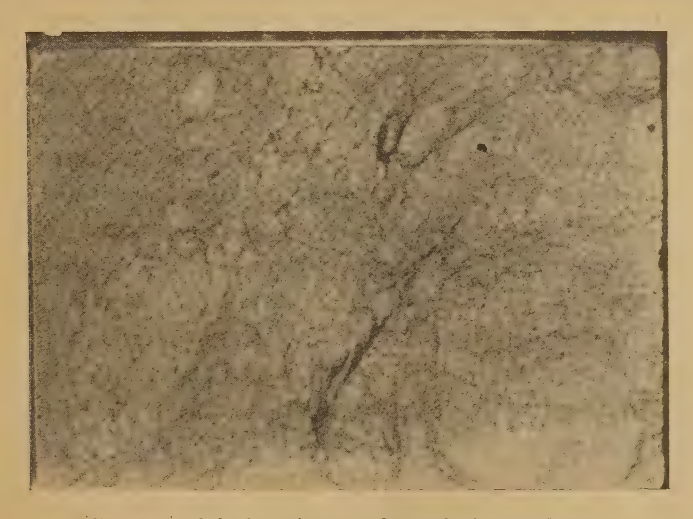


Fig. 8. — Calcaire teinté par la méthode Grandjean.

On tamise ensuite à la toile 30 (mailles de $0^{mm},5$), pour éliminer la poussière, puis à la toile à mailles de $1^{mm},5$ ou 2 millimètres.

On enferme environ 3 grammes de ces grains dans un petit creuset de porcelaine que l'on munit de son couvercle. Ce creuset est enfermé dans un creuset de platine que l'on munit également de son couvercle.

L'essai étant ainsi préparé, on chauffe un four à moufle jusqu'à 1.000° C., en se guidant pour la température sur des montres de Seger disposées dans le moufle. Lorsque la montre n° 05*a* commence à fléchir, on introduit rapidement le double creuset renfermant le calcaire dans le four, et on note l'heure. On laisse quinze minutes au moufle, puis on retire le double creuset et on le met dans un exsiccateur. Lorsqu'il est refroidi, on l'ouvre, on prélève 1 gramme de calcaire que l'on pèse exactement, et que l'on introduit dans une capsule en porcelaine. On le délaye avec quelques centimètres cubes d'eau distillée, on ajoute 20 centimètres cubes d'acide chlorhydrique à 50 0/0; on évapore doucement au bain de sable, et, lorsque le résidu est sec, on le calcine à 130-150° pendant vingt minutes, pour insolubiliser la silice. Après refroidissement, on reprend par 20 centimètres cubes d'acide chlorhydrique 1 : 1 et on renouvelle l'opération d'évaporation et de calcination.

Après cette deuxième insolubilisation, on reprend le résidu par l'eau acidulée bouillante, on le lave par décantation quatre à cinq fois, puis on le filtre et on le lave à l'eau bouillante sur le filtre.

On sèche, calcine, incinère et pèse. Le poids trouvé est celui de la silice totale contenue dans un gramme du calcaire calciné.

On porphyrise finement le résidu au mortier d'agate, on le fait passer dans une capsule de porcelaine, on y ajoute 150 centimètres cubes de solution de potasse caustique à 3 0/0, fraîchement préparée, et l'on fait bouillir pendant un quart d'heure.

On filtre, lave, sèche et pèse le résidu qui représente l'insoluble.

La différence entre le poids de la silice totale et celui de l'insoluble donne la teneur en silice combinée [1].

En opérant comme il vient d'être dit, nous avons pu constater qu'il existe une relation frappante entre la proportion de silice combinée à 1.000°, pendant quinze minutes, et la qualité du calcaire.

[1] Tout autre procédé de dosage de la silice combinée pourrait être employé. Nous avons décrit celui qui nous a servi à faire nos expériences.

C'est ainsi qu'avec sept échantillons de calcaires de provenances différentes, nous avons trouvé les proportions suivantes de silice combinée à 1.000° [1] (tableau I) :

TABLEAU I

ÉCHANTILLON	Silice combinée / Silice totale 0/0	Résidu insoluble 0/0
A	71,7	14,8
H	53,3	18,4
G	48,1	17,2
E	40,2	13,7
F	38,9	17,0
D	29,7	15,2
C	29,6	13,8

Pour apprécier la qualité des calcaires en question, nous avons procédé sur chacun d'eux à des cuissons se rapprochant le plus possible des cuissons industrielles. Les produits de la cuisson ont été éteints, les grappiers séparés à la toile 80 et triturés.

La résistance de ces grappiers triturés nous fournit la meilleure indication de la qualité des calcaires, puisque le grappier est l'essence même des produits hydrauliques.

Or, voici les résistances des grappiers.

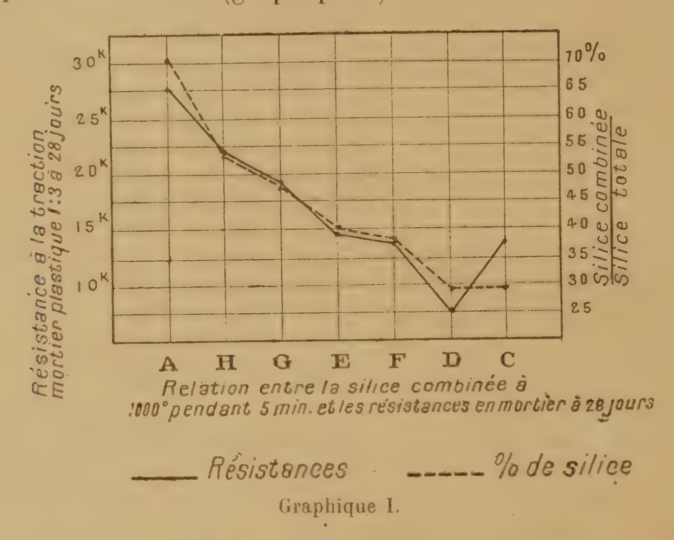
TABLEAU II

	PATE PURE			MORTIER 1/3 PLAST.		
	7 j.	28 j.	84 j.	7 j.	28 j.	84 j.
Grappier provenant du calcaire A	29,2	36,2	34,5	23,1	28,0	29,5
— — H	23,0	29,0	31,8	13,9	21,9	25,6
— — G	17,9	24,3	25,7	11,0	19,5	24,5
— — F	10,3	15,5	25,0	7,7	15,7	18,0
— — E	9,0	15,0	26,5	7,6	14,7	21,0
— — C	3,0	10,0	22,0	6,0	14,0	14,5
— — D	—	—	—	4,5	7,5	—

(1) Ces calcaires ayant des teneurs différentes en résidu insoluble, nous avons dû, pour pouvoir les comparer entre eux, au point de vue de la capacité de combinaison de la silice à 1.000°, rapporter par le calcul le chiffre de silice combinée trouvé, à 100 de silice totale. C'est cette proportion centésimale qu'indique le tableau ci-dessus.

L'ordre dans lequel se classent les calcaires, d'après la résistance mécanique de leurs grappiers, est bien en somme le même que celui dans lequel ils se sont classés d'après la proportion de leur silice combinée à 1.000°.

L'interversion des calcaires E, F, d'une part, C et D d'autre part, était naturelle, vu la proportion toute semblable de silice combinée qu'ils ont donnée (graphique I).



Graphique I.

Depuis lors, le procédé chimique de la cuisson à basse température a été recommandé aux cimentiers, sous le nom de « recherche de l'aptitude à la cuisson », par M. Hendrickx, le distingué technicien.

Celui-ci a insisté sur l'importance de ce procédé pour l'étude des pâtes crues.

Les fabricants de ciment artificiel ont, en effet, autant d'intérêt que les fabricants de ciment naturel à étudier leurs matières premières, mais généralement, c'est surtout la qualité de l'argile qui les intéresse.

Les calcaires durs ou argileux qu'ils emploient sont, à de rares exceptions près, convenables, puisqu'ils ne sont employés qu'après broyage. Au contraire, les argiles peuvent contenir du quartz qu'on a toujours de la peine à faire entrer en combinaison, même après trituration. Dans ce cas, l'examen microscopique des argiles en lumière polarisée offre un intérêt particulier.

Nous donnons ci-dessous la photographie de deux lames minces projetées par M. Bied et M. Jourdain à la séance de l'*Association Franco-Belge des Méthodes d'essais* du 23 juin 1923 (*fig.* 9 et 10).

Les deux argiles ont l'analyse suivante :

Analyse U *Argile A*		Analyse Y *Argile B*	
SiO^2	38,42	SiO^2	39,88
Al^2O^3	11,83	Al^2O^3	10,55
Fe^2O^3	4,72	Fe^2O^3	4,60
CaO	20,73	CaO	21,42
MgO	0,47	MgO	0,57
S	0,34	S	0,25
Alcalis en K^2O	3,23	Alcalis en K^2O	2,64
Perte au feu	20,54	Perte au feu	20,70

Elles contiennent pratiquement la même quantité de quartz, mais la grosseur des grains est très différente de l'une à l'autre et une

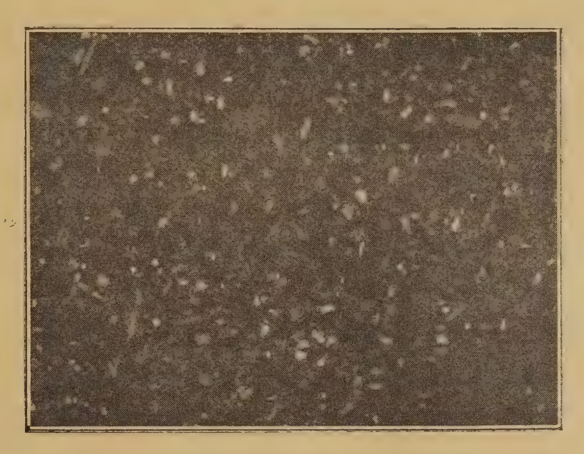


Fig. 9.

de ces matières doit se révéler comme très inférieure pour la fabrication du ciment.

Le même procédé est applicable à l'étude des calcaires naturels. Malheureusement, la fabrication de lames minces est très difficile ; elle nécessite de véritables spécialistes qui n'existent que dans les grandes villes.

Il semble donc que, pendant un certain nombre d'années au moins, l'emploi du miscroscope polarisant, qui deviendra certaine-

ment plus tard la méthode de choix pour l'étude des matières premières, ne pourra être employé que dans les laboratoires scientifiques ou dans les usines puissamment outillées. La méthode



Fig. 10.

chimique restera seule employée dans les usines de moyenne importance. Elle a, d'ailleurs, l'avantage de permettre l'étude des modifications à apporter à l'aptitude à la cuisson, par l'addition de fondants divers à la pâte, ce que ne permet pas l'examen pétrographique des matières premières.

CHAPITRE II

RECHERCHES SUR LA CONSTITUTION INTIME DES LIANTS HYDRAULIQUES

ET SUR LEURS PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES

CHAPITRE II

RECHERCHES SUR LA CONSTITUTION INTIME DES LIANTS HYDRAULIQUES ET SUR LEURS PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES

§1. — COMBINAISON DE LA SILICE ET DE LA CHAUX A BASSE TEMPÉRATURE

Les essais chimiques sur la constitution intime des calcaires nous ayant montré que la silice se combinait à la chaux à basse température, il y avait intérêt à savoir quelle était la formule du composé chimique qui se formait.

Pour cela il faut déterminer quelle est la quantité de chaux combinée à la silice.

Deux procédés peuvent être employés :

1° Si on opère à une température voisine, mais inférieure, à celle du départ de l'acide carbonique, la quantité de chaux combinée doit correspondre moléculairement à la quantité d'acide carbonique déplacé par la silice.

2° Mais on peut aussi doser la chaux combinée au moyen du procédé que nous indiquons plus loin, et qui consiste à éteindre le produit en présence de la vapeur d'eau à 150°. La quantité d'eau fixée à cette température l'est intégralement sur la chaux vive, et on peut déduire de la quantité d'eau fixée la quantité de chaux vive existante et la quantité de chaux combinée à la silice par différence entre la chaux totale et la chaux vive.

Nous avons donc fait deux séries d'expériences (1) :

1° En triturant des calcaires à la grosseur de grains de riz, entre

(1) Tous ces essais ont porté sur des calcaires du Teil, dans lesquels le résidu est de la silice presque pure.

la toile n° 50 et la toile de $1^{mm},5$; en les passant dans un moufle, sous double creuset fermé, pendant quinze minutes, à une température comprise entre 900 et 950°. Le tableau III résume les résultats des essais.

TABLEAU III

DÉSIGNATION des ÉCHANTILLONS	COMPOSITION CHIMIQUE				
	Résidu insoluble dans HCl sur calcaire cru	Silice sableuse sur calcaire cuit à 950° pendant 15 minutes	Silice combinée sur calcaire cuit à 950° pendant 15 minutes	Perte de poids par cuisson à 950° pendant 15 minutes	Perte de poids calculée d'après la silice combinée
	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
Échantillon n° 1	12,00	8,65	5,25	9,10	1,73
— n° 2	19,00	9,70	9,00	15,05	1,67
— n° 3	23,20	11,30	7,20	12,60	1,75
— n° 4	15,90	8,60	4,30	6,25	1,45
— n° 5	17,10	8,50	7,50	12,95	1,73
— n° 6	16,00	10,00	6,30	11,00	1,74
— n° 7	16,45	8,20	7,40	13,37	1,80
— n° 8	18,30	12,00	6,50	9,70	1,49
— n° 9	13,50	8,70	5,70	11,95	2,09
— n° 10	13,25	8,60	4,30	6,40	1,88
— n° 11	16,20	10,00	7,20	12,50	1,73
n° 12	20,50	15,80	6,10	8,70	1,40
— n° 13	13,80	11,50	7,60	12,00	1,57
— n° 14	19,60	11,85	7,45	12,50	1,67
— n° 15	13,90	11,90	6,35	10,10	1,58
— n° 16	14,45	9,60	5,60	8,30	1,48
MOYENNES			6,447	10,785	1,67

La première colonne donne le résidu insoluble du calcaire; la seconde, la silice sableuse (ou autrement dit l'insoluble dans les alcalis) dosée sur le calcaire cuit à 950°, pendant quinze minutes; la troisième, la silice combinée dans les mêmes conditions ; la quatrième, la perte de poids constatée pendant la cuisson; la cinquième, le rapport des chiffres de la colonne quatre à ceux de la colonne trois.

La moyenne de ces nombres est de 1,67. Dans 50 0/0 des cas, la différence par rapport à la moyenne ne dépasse pas 5 0/0. Dans la majorité des autres, elle varie entre 10 et 15 0/0. Dans un seul, elle atteint 25 0/0. On peut donc dire que l'ensemble des résultats est assez concordant.

Or, à une quantité donnée X d'acide carbonique disparu corres-

pond une quantité de chaux mise en liberté égale à 1,27 X. Le rapport pondéral de la chaux combinée à la silice combinée est donc égal à 1,67 × 1,27, c'est-à-dire à 2,12, et la formule chimique du composé formé correspond sensiblement à :

$$SiO^2, 2{,}25\,CaO.$$

2° Des calcaires triturés de la même façon ont été portés au moufle, sous double creuset fermé, à une température supérieure à celle du départ de l'acide carbonique (1.000°), et pendant deux heures, au lieu d'un quart d'heure.

Le tableau IV donne la teneur de divers calcaires en résidu insoluble (sur le calcaire cru), l'insoluble et la silice combinée sur le calcaire calciné, la quantité de chaux fixée, la quantité d'eau absorbée après traitement, et le rapport pondéral entre la chaux fixée et la silice combinée.

TABLEAU IV

DÉSIGNATION des ÉCHANTILLONS	COMPOSITION CHIMIQUE						
	Résidu insoluble dans HCl sur calcaire cru	APRÈS CUISSON A 1.000° PENDANT 2 HEURES				Eau fixée après 2 heures de traitement à la vapeur d'eau	Rapport pondéral entre la chaux fixée et la silice combinée
		Silice sableuse	Silice combinée	Chaux totale	Chaux fixée (1)		
	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	
Échantillon DC'....	15,60	10,50	13,90	74,10	38,03	11,60	2,73
— J......	14,00	8,25	13,25	77,00	36,57	13,00	2,76
— BB'....	16,80	3,10	20,67	74,73	46,12	9,20	2,23
— HI	23,00	22,80	12,90	62,80	32,95	9,60	2,55
— IJ.....	14,00	9,50	13,50	75,50	33,83	13,40	2,50
— CD....	25,80	8,90	20,00	69,60	49,39	6,50	2,47
— ED....	16,30	10,50	14,00	74,00	33,57	13,00	2,39
MOYENNES...............			15,47		38,63		2,52

(1) Différence de la chaux totale et de la chaux vive, calculée d'après l'eau fixée.

La moyenne de ce rapport est de 2,52, ce qui donne, pour la formule du composé produit :

$$SiO^2, 2{,}70\,CaO.$$

Étant données les erreurs d'expériences, forcément nombreuses avec un procédé opératoire peu précis, on peut admettre que la

combinaison de silice et de chaux qui se forme à basse température est probablement amorphe et a une formule voisine de SiO^2, 2,5CaO.

§ 2. — CONSTITUTION DES CIMENTS PORTLAND

Depuis les travaux de MM. Le Chatelier et de Tornebohm, il est reconnu que les produits hydrauliques actifs : ciments Portland, ciments naturels ou de grappiers, sont essentiellement composés de cristaux déposés au sein d'une masse vitreuse.

Les cristaux ont été nommés « alite » par Tornebohm et la masse vitreuse « célite ».

M. Le Chatelier, qui avait reconnu l'identité des cristaux de ciment Portland ordinaire et de ceux des grappiers ultra-siliceux du Teil, leur attribuait la composition du silicate tricalcique.

D'innombrables travaux ont été faits depuis pour rechercher la composition de l'alite et de la célite, mais tous ces travaux ont été dirigés avec l'idée préconçue que le silicate tricalcique n'ayant jamais pu être obtenu à l'état de pureté, les cristaux d'alite devaient contenir de l'alumine.

Il n'y a aucune raison, *a priori*, pour que cette idée soit vraie; il suffit, en effet, que les cristaux de silicate tricalcique ne puissent se former qu'au sein d'une masse fondue, comme la célite, pour que l'analyse d'un clinker donne toujours des quantités dosables de fer ou d'alumine.

Tous les travaux effectués sur la composition des ciments Portland ont, d'ailleurs, été exécutés uniquement avec les ciments Portland ordinaires du commerce, très chargés en alumine, et les chercheurs ont constamment perdu de vue que, comme l'avait montré M. Le Chatelier, il existait des ciments contenant des quantités infiniment petites d'alumine et de fer, dans lesquels on retrouvait aussi des cristaux d'alite.

Aussi peut-on dire, *a priori*, que l'affirmation du Dr Jaenecke, que l'alite a pour formule :

$$2SiO^2,Al^2O^3,8CaO,$$

est fausse, puisque dans beaucoup de ciments, contenant cependant de l'alite, la teneur en alumine est inférieure à celle qu'indique cette formule.

Nous croyons intéressant de rappeler ici les résultats des recherches de M. Campbell (*The Journal of Industrial Engineering Chemistry*, août 1913, p. 627).

Cet expérimentateur a obtenu, par une méthode élégante, mais malheureusement imparfaite, des analyses d'alite et des analyses de célite assez constantes.

Sa méthode consistait à absorber, pendant la cuisson, la matière vitreuse, célite, qui fond avant l'alite, au moyen d'un disque en magnésie pure en contact avec un disque de clinker.

Voici une des analyses obtenues pour l'alite :

SiO^2	23,34
Al^2O^3	1,76
Fe^2O^3	0,74
CaO	71,14
MgO	2,91

tandis que les analyses de célite donnaient :

SiO^2	15,37
Al^2O^3	11,69
Fe^2O^3	3,50
CaO	61,40
MgO	7,04

D'autre part, si l'on cuit à très haute température, dans un foyer à gaz comme ceux que j'ai fait installer aux Usines du Teil, la chaux extra-siliceuse dont l'analyse est universellement connue (1), on obtient un ciment d'excellente qualité dont l'analyse est la suivante :

SiO^2	23,30
Al^2O^3	2,40
Fe^2O^3	0,90
CaO	70,70
MgO	1,40
Matières volatiles	0,20
Non dosés	1,10

(1) L'analyse de la chaux du Teil est en moyenne de :

SiO^2	22,00
Al^2O^3	1,40
Fe^2O^3	0,80
CaO	65,70
MgO	1,40
SO^3	0,50
Perte au feu	8,20

Cette analyse est tellement voisine de l'analyse attribuée par Campbell à l'alite qu'on ne peut pas être frappé de la coïncidence.

Avec une chaux un peu moins siliceuse, j'ai même obtenu des ciments parfaitement stables à chaud, se présentant en roches compactes, ayant subi une fusion pâteuse, et dont l'analyse était :

SiO^2	21,70
Al^2O^3	2,20
Fe^2O^3	1,30
CaO	73,10
MgO	1,70

Or, il n'y a pas de doute que ces ciments contenaient au moins un peu de célite, puisqu'ils ont le même aspect de cristallisation que les ciments Portland ; il est donc très probable que l'alite analysée par Campbell en contenait encore.

Si l'on suppose vraie l'analyse de la célite de Campbell et si l'on admet que toute l'alumine existant dans son alite provenait d'un reste de célite, on est amené à retrancher des analyses d'alite les quantités :

SiO^2	2,40
Al^2O^3	1,76
Fe^2O^3	0,74
CaO	9,22
MgO	1,00

il resterait pour les cristaux d'alite la composition :

SiO^2	22,00
CaO	61,82
MgO	1,00

qui est légèrement plus basique que celle du silicate tricalcique, tout en s'en rapprochant beaucoup.

Il semble donc infiniment probable que les cristaux d'alite ne sont que des cristaux de silicate tricalcique, ou d'une solution solide de même composition et, il est certain que la quantité de célite nécessaire pratiquement à la cristallisation de l'alite peut être très réduite.

Bien plus, dans les ciments très siliceux cuits aux fours à gaz, la quantité de chaux est trop élevée pour saturer la silice simplement en silicate tricalcique et il faut donc admettre l'hypothèse

d'une solution solide, puisque les ciments obtenus sont parfaitement stables et supportent les essais à chaud réputés les plus durs.

Les travaux de Campbell ne sont pas en contradiction avec cette conclusion. Il est probable, d'après ce qui a été dit plus haut, qu'il s'agit d'une solution de chaux dans le composé SiO^2, 2,5CaO.

On peut remarquer, en passant, que la formule de Jaenecke : $2SiO^2$, Al^2O^3, 8CaO, qui correspond bien, d'après Hans Kuhl, à un composé défini (*Tonindustrie-Zeitung*, n° 23, 21 février 1914, p. 365), se rapproche assez sensiblement de la formule obtenue par Campbell pour la célite.

On n'est pas encore très fixé sur le point de savoir si la célite a des propriétés hydrauliques et quelles sont ces propriétés hydrauliques.

§ 3. — EXTINCTION DE LA CHAUX VIVE EXISTANT APRÈS CUISSON DANS LES CHAUX ET CIMENTS

Le problème de l'extinction rationnelle des chaux hydrauliques est un des plus délicats à résoudre pour le fabricant.

Il s'agit, en effet, de soumettre à l'action de l'eau des produits qui sont attaqués par elle et qui perdent, à son contact, leurs propriétés.

Pour y voir un peu clair, nous avons étudié la décomposition des silicates et des aluminates basiques par l'eau ou la vapeur d'eau, à la pression atmosphérique, à diverses températures en dessous de la température de dissociation de l'hydrate de chaux.

Cette étude a été faite au moyen d'un instrument de laboratoire dont voici la description (*fig.* 11).

L'appareil se compose essentiellement d'un cylindre ABCD, en cuivre, muni d'une tubulure fixe T et d'une tubulure démontable T′ (pour pouvoir introduire la matière à essayer), laquelle est munie d'une poulie P. Ce cylindre est :

1° Relié en F par un joint tournant au col d'une cornue où on maintient de l'eau en ébullition ; avec interposition d'un surchauffeur pour ne pas avoir d'eau vésiculaire ;

2° Entouré d'un autre cylindre A′B′C′D′, en deux parties, également en cuivre, chauffé par une rampe à gaz, ou électriquement, muni de thermomètres qui permettent de suivre constamment la température intérieure ;

3° Animé d'un mouvement de rotation de 5 à 6 tours par minute, grâce à la poulie P, au moyen d'un petit moteur à air chaud, par exemple.

Le ciment a étudier est mis dans le cylindre ABCD, soit en vrac, soit, pour de petites quantités, dans de petits sacs de toile peu serrée. Cette dernière manière de faire permet d'opérer avec 50 grammes de ciment, de mettre à la fois plusieurs échantillons dans l'appareil

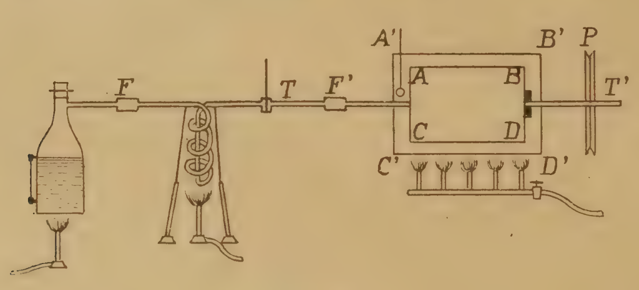


Fig. 11.

et d'éviter l'enlèvement des fines poussières par le courant de vapeur.

J'ai obtenu les résultats suivants :

1° Un ciment quelconque, ayant supporté l'épreuve à l'eau chaude traité par la vapeur d'eau au-dessus de 150°, n'absorbe pas d'eau, ce qui prouve :

a) Que les hydrates des aluminates et silicates ne peuvent se former à cette température et que, par conséquent, ils ne peuvent exister qu'au-dessous de 150° C. ;

b) Que les aluminates et les silicates basiques, dont la décomposition amène la prise du ciment, ne sont pas attaqués par la vapeur d'eau à cette température, et sous la pression atmosphérique, car s'ils étaient décomposés, une certaine quantité de chaux serait mise en liberté, ce qui amènerait une absorption d'eau, car l'hydrate de chaux ne se dissocie dans une atmosphère saturée de vapeur d'eau que vers 500°.

2° Un ciment éventé naturellement, ou artificiellement par pulvérisation d'eau à sa surface, perd, au-dessous de 150°, une partie de l'eau fixée à froid : celle fixée sur les silicates ou les aluminates. Il garde complètement l'eau fixée sur la chaux, provenant de la décomposition des silicates.

3° Un ciment normalement dosé, cuit jusqu'à fusion pâteuse, et additionné d'une quantité connue de chaux vive, traité à 150° par la vapeur d'eau, absorbe la quantité d'eau exactement nécessaire à l'extinction de la chaux introduite. Le poids de celle-ci peut donc être calculé d'après la quantité d'eau absorbée.

Ces trois phénomènes ont été vérifiés par M. Blount, de Londres, auquel nous avions communiqué nos observations.

Voici la lettre que ce savant nous écrivait à ce sujet, et je profite de l'occasion pour le remercier ici des vérifications qu'il a bien voulu faire, et de son amabilité :

« J'ai fait des expériences avec les méthodes que vous avez eu l'obligeance de me communiquer, et j'ai trouvé qu'il est absolument correct de dire que les silicates et aluminates de ciment Portland ne deviennent pas hydratés dans la vapeur d'eau à 140-150° et qu'à cette température la chaux caustique est complètement hydratée.

« J'ai fait aussi la preuve que lorsque le ciment Portland, qui a été demi-liquéfié et se trouve libre de chaux non combinée, est mélangé à un poids connu de CaO, la quantité de cette addition CaO peut être déterminée avec une parfaite exactitude.

« Mais lorsqu'une quantité connue de CaO pure est ajoutée au ciment Portland qui a été *légèrement aéré* et contient une certaine quantité d'eau combinée avec ses silicates et aluminates, on ne peut pas déterminer la quantité de chaux ajoutée, parce que l'augmentation de poids du mélange représente le total algébrique de l'eau absorbée par la chaux, et de celle qui a été perdue par les silicates hydratés.

« Il est regrettable que cette difficulté vienne s'opposer à un procédé de dosage d'un caractère si simple et si élégant. »

La remarque faite par M. Blount est exacte. Il existe des ciments qui, à la mise en sacs, contiennent et de l'eau fixée sur les silicates et de la chaux vive. Cela peut être, en particulier, le cas des ciments de grappier qui ne perdent leur gonflement en silos que parce que l'eau fixée sur les silicates se reporte sur la chaux vive, comme l'a montré, depuis plus de vingt ans, M. H. Le Chatelier [1].

Mais la difficulté peut être levée en n'introduisant la vapeur d'eau

[1] Il suffit qu'il y ait plus d'eau fixée sur les silicates que la chaux vive n'en a exigé dans la suite pour s'éteindre.

dans l'appareil rotatif qu'après y avoir laissé séjourner le ciment un certain temps à 150°, dans l'air sec.

Il suffit alors de faire la perte au feu à 500° : 1° sur le produit initial ; 2° sur le produit resté dans l'extincteur, sans vapeur ; 3° sur le produit complètement éteint, pour avoir l'eau fixée sur les silicates et l'eau fixée sur la chaux.

A vrai dire, la chaux calculée d'après cette mesure d'eau absorbée représente à la fois et la chaux vive qui existait dans le ciment après cuisson, ou la chaux ajoutée, et la chaux qui a été mise en liberté lors de l'attaque des silicates et des aluminates, par suite d'éventement.

Pour arriver à distinguer ces deux quantités de chaux, il faudrait connaître le rapport pondéral qui existe, pour le ciment étudié, entre l'eau fixée sur les silicates et les aluminates et la chaux mise en liberté pendant la décomposition de ceux-ci. Cette recherche peut être faite, au moins approximativement. Il suffit de rééventer le ciment étudié soit par pulvérisation d'eau à sa surface, soit dans la vapeur d'eau à 100°. Cet éventement donnera naissance à une nouvelle quantité de chaux mise en liberté et, en recommençant l'expérience ci-dessus, on pourra connaître, par différence des chiffres fournis par la première et la seconde expérience, la quantité d'eau fixée à nouveau sur les silicates et les aluminates, et la quantité de chaux correspondante mise en liberté ; donc, pour le ciment étudié, le rapport pondéral de l'eau fixée sur les silicates à la chaux mise en liberté.

D'autres expériences, faites avec cet appareil, nous ont donné des résultats intéressants. C'est ainsi que nous avons constaté que la température de décomposition des aluminates basiques, en aluminates plus acides, était plus élevée que celle de décomposition des silicates ; les aluminates sont, en effet, attaqués à 120°, alors que les silicates ne le sont pas.

Cette propriété permet de rendre lents les ciments prompts, ce qui prouve que la prise rapide de ceux-ci est due à des aluminates ou, au moins, aux silico-aluminates de la célite (tableau V).

Durcissement des ciments. — Le même appareil peut servir à l'étude du durcissement des ciments, et s'il ne permet pas de se rendre compte de tous les détails de ce durcissement, il permet de

Tableau V. — **Essais d'extinction.**

Nos de l'essai	Désignation du produit	Témoin			Traité à la vapeur d'eau à 100°				Traité à la vapeur d'eau à 130°				Traité à la vapeur d'eau à 150°				Traité à la vapeur d'eau à 200°			
		Perte au feu	Prise Début	Prise Fin	Temps de séjour	Perte au feu	Prise Début	Prise Fin	Temps de séjour	Perte au feu	Prise Début	Prise Fin	Temps de séjour	Perte au feu	Prise Début	Prise Fin	Temps de séjour	Perte au feu	Prise Début	Prise Fin
5	Ciment siliceux, éventé, mais stable	4,90	4^h00	9^h00	»	»	»	»	0^h30	4,60	4^h00	11^h00	0^h30	4,60	4^h00	11^h00	»	»	»	»
					»	»	»	»	1 30	4,35	4 00	11 00	1 30	4,35	4 00	11 00	»	»	»	»
107	Ciment prompt..........	1,90	0 01	0 02	»	»	»	»	4 00	2,80	12 00	68 00	5 00	2,06	0 03	0 05	5^h00	2,06	0^h03	0^h05
103	Ciment prompt..........	2,80	0 02	0 04	»	»	»	»	1 00	4,50	3 25	6 45	5 00	2,95	0 05	0 07	»	»	»	»
130	Ciment prompt..........	3,65	0 02	0 65	3^h00	6,20	4^h05	15^h05	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
99	Ciment Portland..	4,90	8 00	17 00	»	»	»	»	1 00	5,20	15 00	52 00	15 00	4,90	9 00	18 00	»	»	»	»
76	Ciment Portland (1)......	2,90	1 20	3 05	»	»	»	»	1 00	3,30	7 00	22 00	5 00	2,40	1 20	2 55	»	»	»	»

(1) Ce ciment était éventé, comme le prouve la diminution de la perte au feu après séjour à la vapeur d'eau à 150°.

voir que la proportion de grains attaqués dans le durcissement des liants hydrauliques est excessivement faible.

L'examen microscopique des ciments durcis montre que les aiguilles de chaux cristallisées enrobent les grains de ciment et empêchent tout contact de ces grains avec l'eau, ce qui arrête, bien entendu, toute réaction ultérieure.

Il faut avoir soin, dans une pareille recherche, de ne faire la perte au feu du ciment durci qu'à 500°, car en la faisant à 800°, on recombine la chaux, mise en liberté, aux silicates acides formés et on obtient, lors de la réhydratation de la chaux, une quantité d'eau fixée inférieure à celle qu'on trouvait avant le durcissement.

La quantité de chaux mise en liberté, pendant le durcissement, est toujours très faible : 3 à 4 0/0 ; le maximum est atteint au bout d'un mois ; ensuite, la chaux paraît diminuer par suite de l'influence prépondérante de la carbonatation.

CHAPITRE III

RECHERCHES SUR LES DÉCOMPOSITIONS DES MORTIERS PAR LES EAUX SULFATÉES ET MOYENS D'Y REMÉDIER

CHAPITRE III

RECHERCHES SUR LES DECOMPOSITIONS DES MORTIERS PAR LES EAUX SULFATÉES ET MOYENS D'Y REMÉDIER

Les premières décompositions des chaux et ciments par le sulfate de chaux ont été signalées par le capitaine Dolot de l'arme du Génie. Quant aux décompositions des ciments à la mer elles n'avaient pas échappé à Vicat; dans son *Résumé sur les connaissances actuelles et positives sur les mortiers et ciments calcaires* (1828); et dans ses *Nouvelles études sur les pouzzolanes artificielles* (1846), il attire l'attention des constructeurs sur les avantages que pouvait leur procurer l'argile déshydratée pour obtenir des ciments résistant à l'action décomposante de l'eau de mer.

Depuis, les travaux de Candlot et pincipalement de M. Le Chatelier ainsi que quelques remarques de M. Maynard ont permis de se rendre compte de l'influence prépondérante, sur la marche des décompositions, de la teneur des ciments Portland en alumine et en chaux.

Il n'est pas inutile de signaler qu'il y a deux modes de décomposition : l'un qui produit des éclatements par suite de formation de sulfo-aluminate de chaux ou sel de Candlot $Al^2O^3, 3CaO, 3(CaO, SO^3)$ $30H^2O$; l'autre qui produit une décomposition savonneuse et provient très probablement de dissolutions et de cristallisations successives des sels à l'intérieur des mortiers.

L'action de l'argile déshydratée que préconisait Vicat et dont l'emploi était tombé dans un oubli complet, probablement à cause des difficultés pratiques de sa fabrication, est aussi favorable pour combattre l'action des eaux sulfatées que pour résister à celle de l'eau de mer, comme il ressort des essais de laboratoire que nous

avons faits à la suite des décompositions de mortiers par le sulfate de chaux, dont nous eûmes à nous occuper.

Nous rappellerons celles-ci en un premier paragraphe en donnant quelques extraits de notre communication de 1902 à l'Association Internationale pour l'Essai des Matériaux.

Et les essais qui en furent la suite feront l'objet du paragraphe II.

§ I. — COMMUNICATION DE 1902 A L'ASSOCIATION INTERNATIONALE POUR L'ESSAI DES MATÉRIAUX

I. Tunnel d'Alicun sur la ligne de Linarès à Alméria en Espagne (1900). — La chaux employée avait été la chaux hydraulique de première qualité, marque Lafarge, et M. Gueylard, ingénieur en chef à la Compagnie Fives-Lille, signalait à M. l'Inspecteur général Boutillier l'état des maçonneries, dans les termes suivants que je transcris, car cette description est caractéristique.

« *Tunnel.* — Le mortier, à une tête comme à l'autre, est sans cohésion ; il ne s'enlève pas par blocs, comme je m'y attendais, il est comme pulvérulent et humide, et n'adhère pas généralement à la pierre et, pourtant, la tête Linarès a été construite au mois d'octobre dernier, peu de temps avant votre inspection. Elle avait même, à cette époque, très bon aspect. La maçonnerie et son mortier devraient avoir fait une bonne prise, ce qui n'est pas... De plus le mortier qui a fait une prise convenable et qui est dur (il y en a dans quelques endroits, notamment dans les extrémités des murs en retours encastrés dans le terrain), mis actuellement dans l'eau, se décompose et s'égrène, sous l'effort des doigts. En un mot, le mortier n'est pas bon. J'avais déjà remarqué qu'il se détachait par plaques, en se boursouflant, dans les joints des murs de tête.

« A l'ouvrage de trois mètres de la China, en septembre dernier, environ trois mois après son achèvement, des effets se produisirent qui m'étonnèrent ; le mortier des joints, aux extrémités des murs en ailes, c'est-à-dire aux extrémités mêmes de l'ouvrage, se craquelait, se boursouflait.

« J'attribuais alors cela à la mauvaise exécution du rejointement, fait pendant les fortes chaleurs. On dégrada les joints, on attendit que l'été fût passé, et on refit le travail dans de bonnes conditions de température et d'exécution.

« Cet ouvrage, à ses extrémités, est aujourd'hui dans les mêmes conditions qu'en septembre dernier, le mortier est craquelé et boursouflé, le couronnement des murs en retrait un peu détaché. Le mortier des joints soulevé est sans dureté, il est décomposé superficiellement et l'on voit déjà le mal s'étendre des extrémités sur les murs en ailes et les piédroits. Il n'y a cependant pas de fissures dans la maçonnerie, les joints seuls sont atteints. »

Il y a lieu de retenir parmi ces faits :

I. La rapidité avec laquelle les décompositions se produisaient (cinq ou six mois après l'emploi);

II. L'absence de décomposition dans le même laps de temps, dans les murs complètement encastrés dans le terrain ;

III. L'absence des fentes dans les maçonneries, les effets étant limités aux joints.

En 1900, des phénomènes analogues s'étant produits dans les culées du viaduc du Salado, M. l'inspecteur général Boutillier voulut bien m'envoyer deux échantillons de mortier, l'un prélevé en mai 1898 et l'autre en 1900.

Cette culée, construite pendant la campagne de 1897, était restée intacte jusqu'au printemps de 1898 ; mise en contact avec des remblais humides, les joints avaient été détruits sur une profondeur d'environ $0^m,10$, en même temps que des fissures imperceptibles se montraient en parement. Enlevant les terres, on avait alors protégé le massif maçonné en l'enveloppant, sur tout son pourtour autre que le parement, par une chemise en maçonnerie de moellons smillés hourdés au ciment de grappier à fort dosage et parfaitement étanche ; tout mouvement avait alors disparu et la situation s'était maintenue dix-huit mois.

Mais au commencement de 1900, comme on avait accumulé, contre les parties non protégées par ce mur, des remblais gypseux humides, les phénomènes se sont reproduits et multipliés.

Les échantillons furent analysés et donnèrent :

Celui de 1898, SO^3......	0,30 0/0	avec une perte au feu semblable.
Celui de 1900, SO^3......	2,05 0/0	

Les deux mortiers ne provenant pas du même point de la culée, l'expérience fut déclarée douteuse et recommencée sur des mortiers provenant des mêmes points.

L'analyse indique :

	1er échantillon	2e échantillon
	—	—
Mortier prélevé en novembre 1897, SO^3.......	1,01	1,37
Mortier prélevé en septembre 1900, SO^3......	2,30	2,26

avec des pertes au feu de même ordre, des teneurs en chaux et en magnésie sensiblement égales.

La genèse du phénomène était parfaitement expliquée.

II. **Souterrains de Rimont et de la Plagnotte.** — Les souterrains de Rimont et de la Plagnotte sont situés sur la ligne en construction de Saint-Girons à Foix, aux environs du kilomètre 15.

Le premier a un peu plus de 800 mètres de long.

La voûte a été commencée en juin 1895 et terminée en septembre 1899, les piédroits commencés en septembre et finis en février 1899.

Le cube approximatif des maçonneries est de 13.800 mètres cubes.

Le deuxième a un peu plus de 200 mètres de longueur. La construction de la voûte a été commencée en janvier 1895 et s'est terminée en mars 1898, celle des piédroits a commencé en août 1895 et s'est terminée en février 1898.

Le cube approximatif des maçonneries est de 5.200 mètres.

Dans les deux souterrains, les mortiers ont été faits exclusivement avec de la chaux du Teil (ficelle verte) (une marque qui n'est d'ailleurs jamais livrée pour les travaux à la mer) au dosage de 300 kilogrammes par mètre cube de sable obtenu par le concassage d'un calcaire dur et compact semi-cristallin.

Le souterrain traverse du gypse pur et des argiles gypseuses.

Les mortiers paraissaient de qualité parfaite lorsque, au mois de septembre 1901, on aperçut une légère boursouflure dans les maçonneries. Un sondage permit de remarquer que les terrains ne poussaient pas, mais que les mortiers étaient totalement décomposés.

Un examen attentif montra qu'il en était ainsi dans beaucoup de points du souterrain.

J'ai examiné deux échantillons d'eau, provenant du souterrain de Rimont et du souterrain de la Plagnotte, qui m'ont été adressés comme prélevés après les pluies et par conséquent devant être d'une saturation probablement inférieure à la moyenne.

J'ai trouvé les analyses suivantes :

SOUTERRAIN DE RIMONT, point kilométrique 14.879

Silice	0,0092	d'où	Sulfate de chaux	1,63
Alumine et Fer	0,002		Sulfate de magnésie	0,36
Chaux	0,85		Chlorure de magnésie	0,008
Magnésie	0,119		Silice	0,009
Acide sulfurique	1,19		Alumine et Fer	0,002
Chlore	0,006		Carbonate de calcium	0,17

Résidu après calcination ... $2^{gr},17$

SOUTERRAIN DE LA PLAGNOTTE

Silice	0,06	d'où	Sulfate de chaux	1,31
Alumine et Fer	0,02		Sulfate de magnésie	0,17
Chaux	0,65		Chlorure de magnésie	0,008
Magnésie	0,059		Silice	0,006
Acide sulfurique	0,89		Alumine et Fer	0,002
Chlore	0,006		Carbonate de calcium	0,11

Résidu après calcination ... $1^{gr},56$

J'ai examiné également divers échantillons de mortiers sains et altérés, prélevés dans ces souterrains.

Tous ces échantillons ont été étonnés, puis séchés et tamisés à la toile 80; ce qui passait à cette toile, vu la nature du sable qui ne contenait pas de fines poussières, représentait le liant hydraulique presque pur.

SOUTERRAIN DE RIMONT

	Mortier sain prélevé au point kilom. 15.267 le 12 avril 1902	Mortier altéré prélevé au point kilom. 14.879 le 12 avril 1902
Parties ayant passé à la toile 80 / Poids total du mortier	$\frac{44}{173} = 25,40$ 0/0	$\frac{194}{913} = 21,20$ 0/0
Silice	20,37	17,64
Alumine et Fer	2,97	2,43
Chaux	54,57	42,22
Magnésie	2,01	2,00
Acide sulfurique	1,24	9,43
Acide carbonique	13,97	19,13
Eau et matières volatiles	4,37	4,80
Non dosés	0,50	2,35
	100,00	100,00

Souterrain de la Plagnotte

	Mortier sain prélevé au point kilom. 16.545 le 12 avril 1902		Mortier altéré prélevé au point kilom. 16.462 le 12 avril 1902
Parties fines ayant passé à la toile 80. / Poids total du mortier	$\frac{40}{244}$ = 16,30 0/0	....	$\frac{215}{1124}$ = 19,10 0/0
Silice	14,90	....	18,22
Alumine et Fer	2,68	....	2,07
Chaux	57,36	....	41,95
Magnésie	1,51	....	2,43
Acide sulfurique	1,09	....	10,59
Acide carbonique	17,67	....	15,60
Eau et matières volatiles	4,23	....	9,00
Non dosés	0,56	....	0,14
	100,00		100,00

Les mortiers paraissant sains eux-mêmes ont un peu plus d'acide sulfurique que la normale.

L'analyse n'ayant pas indiqué d'acide sulfurique en proportion sensible dans les parties restées sur la toile 80, l'acide sulfurique total contenu dans le mortier est de :

$\frac{1,24}{25,4} = 0,48$ 0/0 mortier sain Rimont.

$\frac{9,43}{21,2} = 4,44$ 0/0 id. altéré Rimont.

$\frac{1,09}{16,3} = 0,66$ 0/0 id. sain la Plagnotte.

$\frac{10,59}{18,20} = 5,81$ 0/0 id. altéré la Plagnotte.

Le 4 avril dernier (1902), j'ai visité les souterrains. J'ai pu constater par moi-même que, dans les parties saines, les mortiers étaient très durs et très adhérents aux pierres.

A l'aspect, les grains de sable obtenus par concassage paraissent un peu gros et le mortier semble manquer de la quantité de poussières fines qui l'aurait rendu plus compact. Une teinte rougeâtre, en certains points, semble indiquer qu'il y entre un peu d'argile, mais il doit être assez difficile, dans un souterrain, d'amener le sable parfaitement propre jusqu'au lieu d'emploi, et nous croyons que dans ce cas on a mis le plus de soin possible à la fabrication des mortiers.

La porosité mesurée, d'après la méthode proposée par la Commission, sur trois petits échantillons sains, prélevés au point kilométrique 15.267, était : 0,232; 0,210, 0,280.

J'ai fait les remarques suivantes sur la marche des décompositions.

En quelques points du souterrain, au moment des sondages qui suivirent l'apparition des boursouflures, on trouva le mortier désagrégé sur toute l'épaisseur du mur ; on n'a donc pu savoir par quel côté du mur la désagrégation avait commencé.

En deux points du souterrain de Rimont, j'ai constaté que les mortiers sains, du côté de la voie, étaient en bouillie du côté du terrain.

La décomposition avait donc commencé de ce dernier côté.

Mais, dans la grande majorité des cas, la décomposition avait commencé du côté de la voie, car on trouvait des mortiers encore sains dans la profondeur des murs.

Les décompositions sont nettement plus marquées au-dessous des barbacanes par lesquelles l'eau séléniteuse s'écoule d'une façon constante. Il est inutile de dire que, dans les parties qui ne sont pas aquifères, les mortiers sont absolument sains.

La décomposition s'est donc généralement produite par suite du contact de l'eau séléniteuse, constamment renouvelée, coulant des barbacanes.

La décomposition se manifeste, comme le disait M. Gueylard, pour le tunnel d'Alicun, par des boursouflures dans les joints. Ces boursouflures affectent généralement la forme de champignons ou de loupes assez importantes.

Quand ces loupes apparaissent, le dégât est déjà avancé.

Les soufflures légères aperçues dans les maçonneries et qui ont attiré l'attention sur les décompositions n'ont probablement point pour cause un gonflement important des mortiers, qu'on n'a remarqué nulle part, mais ont été attribuées, avec de grandes chances de certitude, à l'effet des pressions dans les maçonneries dont la résultante, passant peut-être un peu près du joint, agissait sur des maçonneries dont le mortier devenu plastique ne transmettait plus convenablement les pressions et ne s'opposait pas à un léger glissement.

L'action de l'eau sans cesse renouvelée se manifeste non seule-

ment sur les parois du tunnel, mais dans les caniveaux d'évacuation des eaux des tunnels.

Les mortiers de ces caniveaux sont décomposés sur toute la hauteur des piédroits qui est normalement immergée.

Au-dessus du contact des eaux, ils sont absolument sains. La décomposition suit le même processus que dans la voûte : apparition de loupes et mise en bouillie du mortier.

Au sortir du souterrain, dans les tranchées d'accès, les mortiers des caniveaux, le long des tranchées, sont encore décomposés, mais de moins en moins, à mesure qu'on s'éloigne du souterrain, parce que les eaux de pluie, qui s'écoulent des talus, et ne sont pas séléniteuses, viennent diminuer la saturation moyenne des eaux des caniveaux.

En résumé, les décompositions des souterrains de la ligne de Saint-Girons à Foix mettent en évidence deux faits qu'il faut retenir :

A. La décomposition des mortiers par un courant constant (quoique sans infiltration) d'eau sulfatée ;

B. La décomposition par mise en bouillie et sans gonflement du portland peu alumineux.

III. **Décompositions dans le Sud-Algérien.** — Les phénomènes constatés dans le Sud-Algérien le furent dans la région du Chott El-Hodna, sur la route de M'Sila à Bou-Saada.

Ils sont remarquables par leur intensité, tant à cause des liants employés qu'à cause des conditions particulières du climat.

L'analyse de l'eau provenant des fouilles, faite au laboratoire du Service des Mines de Constantine, est la suivante :

Résidu fixe	21,084
SO^3	4,04
$CaCO^3$	0,071
SO^4Ca	0,646
SO^4Na^2	1,179
SO^4Mg	4,674
NaCl	14,547

Telle que l'analyse l'indique, cette eau est infiniment plus redoutable que l'eau de mer.

Les chaux prévues étaient des chaux du Teil, mais elles n'ont pas été employées, l'entrepreneur ayant fait adopter comme simi-

laires d'autres marques, ayant en moyenne l'analyse suivante :

Silice	22 à 25 0/0
Alumine	4 à 4,5
Fer	1,50
Chaux	60,00
Magnésie	0,50
Acide sulfurique	0,60
Perte au feu	10,00

En fondation seulement, et dans certains ouvrages, une chaux siliceuse de la vallée du Rhône a été employée, en remplacement de la chaux du Teil.

Les mortiers sont en sable très fin et le dosage paraît peu élevé, toutes conditions éminemment favorables aux décompositions.

J'ai visité deux ouvrages :

Oued-Charmath (*km.* 72,500). — On y remarque quelques décompositions sans grande importance, mais qu'il est nécessaire de noter parce qu'elles donnent l'indication d'un des modes de destruction.

Les piles et culées proprement dites de l'ouvrage sont saines.

Un petit mur en retour de 1 mètre de hauteur environ (en pierres sèches presque partout) (*fig.* 12) est décomposé dans les rares parties hourdées au mortier et seulement dans le haut. Or, on remarque qu'aux endroits décomposés, le terrain n'a pas été régalé jusqu'en haut du mur et qu'il a dû s'établir en arrière du mur, après les pluies, un petit réservoir d'eau ayant lavé les terrassements et restant au contact des mortiers.

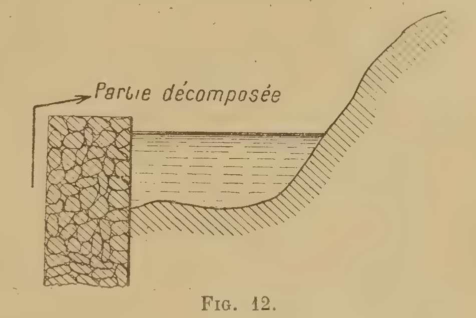


Fig. 12.

Oued-Kelidj el Massa (*km.* 77,500). — Là, l'ouvrage est complètement détruit à peine quelques mois après sa construction, et on est en train d'en reconstruire les culées destinées à supporter le tablier métallique d'une seule travée qui constitue le pont.

Les parties en fondation des culées, situées dans l'eau, sont, d'après le surveillant et l'entrepreneur, en bon état et pas décomposées. Ces fondations sont en chaux siliceuses de la vallée du Rhône.

Au retrait des fondations, les mortiers offrent l'exemple des dé-

compositions des chaux siliceuses que nous avons signalées pour les souterrains de la ligne de Saint-Girons à Foix (mise en bouillie et sans gonflement).

En élévation, dans les parties construites en chaux alumineuses, des gonflements se sont produits, bien plus énergiques dansle haut que dans le bas de l'élévation.

Des fentes très larges se sont ouvertes. L'effet peut se comparer à celui qu'aurait produit l'explosion, à l'intérieur des maçonneries, d'une petite charge de poudre.

En rapprochant l'aspect des décompositions du kilomètre 77,500 de ce qui s'est produit au kilomètre 72,500, il n'y a pas de doute que ces décompositions ne proviennent des infiltrations dans les maçonneries d'eaux de pluie qui ont lavé les terrassements, derrière la culée, infiltrations accentuées par la rapide évaporation que produisait le soleil ou le vent sur le côté oued.

Les terrains argileux qui servent à faire la route se sont, probablement sous l'influence du soleil et du vent, fendillés assez profondément à la surface ; l'eau y a pénétré facilement à $0^m,50$ ou $0^m,60$ de profondeur, puis elle a été arrêtée par une couche plus compacte de terre qui ne l'a plus laissé passer que tout doucement; c'est alors que l'aspiration se produisant à travers les maçonneries, le haut de la culée s'est décomposé.

Les décompositions visibles de mortiers en chaux siliceuses, près du retrait des fondations, doivent être attribuées, sans doute, au contact des eaux séjournant dans l'oued, après les pluies, ou peut-être à l'aspiration par capillarité de l'eau des fouilles.

Une expérience faite sur les travaux, par l'ingénieur des Ponts et Chaussées chargé du service, tendrait, en effet, à prouver que ce deuxième mode de décomposition peut exister et qu'on doit, dans la construction des ouvrages, se mettre en garde, et contre l'action des eaux ayant lavé les terrains, et contre l'action des eaux traversant de bas en haut les maçonneries (dont les fondations sont baignées) sous l'influence évaporatrice du soleil.

Cette expérience est la suivante :

Sur une maçonnerie immergée jusqu'au sol, et dépassant le sol de $0^m,25$ ou $0^m,30$, on a placé des blocs hourdés au mortier de chaux qui se sont décomposés rapidement, sans avoir jamais été en contact avec une autre eau.

Spécimen très réduit d'une demi-page de la table des noms d'auteurs

TABLE ALPHABÉTIQUE DES NOMS D'AUTEURS ET DE TRADUCTEURS

A

ACKERMANN (Ch.)........ 21322
ADAM (I. P.) ... 21216
ALLEMANN (A.). 21241
ALLIX (Ed.).... 21308
APPELL (P.).... 21189 21193
ARAGON (E.) .. 21252

B

BARATIN (F.)... 21288
BARBARIN (P.). 21188
BARDIN (R.). .. 21206 21231
BARET (H.). ... 21350
BARGUES (M.) . 21177
BARRAUD (Dr).. 21326
BARY (P.) 21239
BEAUDONNAT (M.). 21323
BELIN (J.). 21230
BERNARD (P.) . 21335
BESSIÈRE (G.). 21181
BESSON (H.). .. 21195
BIETTE (M.).... 21264
BLAIN (M.) 21233
BLANC (A. E.) . 21203
BONTHOUL (G.). 21301
BOREL (E.) ... 21183 21184
BOUASSE (H.). . 21227 21228
BOUDOT (E.)... 21218
BOURDAIS (M.). 21329
BOURDE (M.) .. 21260
BOUTERON (J.). 21320
BROGLIE (Maurice et Louis DE)......... 21198
BUHL (A.). 21188
BULL (L.)...... 21349
BYÉ (M.). 21323

C

CASTELLI (L.). . 21336
CAVALIERI (G. L.). 21220
CHALON (L.). .. 21282
CHAMBRAN (P.) 21252
CHAMPLY. 21221 21269
CHANLAINE (P.) 21175
CHAPLET (A.).. 21236
CHARLENT (H.). 21259
CHAZY (J.) 21201
CHEVALIER (J.). 21273
CHOJECKI (M.). 21250
CLAUDE (Georges). 21202
COMBEROUSSE (Ch. DE)..... 21180
COMPAING DE LA TOUR (Colonel)........ 21222
COURCELLE (L.) 21261
COUSIN (A.) ... 21194

D

DARMOIS (G.). . 21192
DRACH (J.).... 21193
DEBAUVE (A.) . 21261
DELAPORTE (R.) 21285
DEMESSE (J.).. 21244
DEROUET (G.).. 21260
DONDON (A.)... 21328
DROUETS (G.). . 21317
DRUMAUX (P.). 21197
DUPLANT (F.). . 21306

E

ENGINEER (A.). 21270
EVRARD (E.) .. 21247

F

FABRY (Ch.). .. 21224
FAURE (G.). ... 21283
FORTRAT (R.). . 21196
FOUASSIER (P.) 21330 21331
FOURCAULT (L. D.)......... 21340
FRANCHE (G.) . 21213
FREUND (S.). . 21289
FRIEDEL (J.).. 21246

G

GAIN (R.)...... 21277
GAMBIER (B.). . 21186
GARRAUD (P.).. 21319
GENY (F.). 21309
GEOFFROY (C.). 21286
GODFERNAUX (R.) 21265
GORGEU 21222
GOSSELIN (G.) . 21258
GRAFFIGNY (H. DE). 21204
GRALL (G.) ... 21329
GRAMMONT (A. DE). 21200
GROUARD (A.) . 21225
GUENEAU (L.) . 21346
GUYOT (Y.) ... 21206

H

HAAG (J.) 21178-21179
HANNOUILLE (E.)........ 21255
HAUSER (H.) .. 21295
HEMMERDINGER (Dr).... 21332
HÉRAUD (A.)... 21174
HODÉE (A.). ... 21249
HOPPE (P.). ... 21195
HOUARD (A. H.) 21338

I

IMBRECQ (P.) .. 21310

J

JANVIER (J. M.) 21274
JOUKOV (Anna) 21246
JUMAU (L.). ... 21207

K

KEGHEL (M. DE) 21243
KOUINDJY (Dr). 21327
KRAITCHIK. ... 21191
KYRIACOU (N. C.) 21254
KYSERT (H.)... 21208

L

LABBÉ (Dr et Mme Henri).. 21332
LABORDE-LACOSTE (M.) 21314-21315
LABOUREUR (M.). 21182
LABRIFFE (M.) . 21347
LAGARRIGUE (L.).......... 21302
LANTENOIS. ... 21325
LARCHEVÊQUE (M.). 21342
LASSIEUR (A.). . 21240
LAVERGNE (J.).. 21336
LECERCLÉ (M.). 21308
LE CHATELIER (H.). 21271
LECLAIR (A.). .. 21345
LEFEBVRE (R. et J.). 21318
LEFÈVRE (A.). . 21214 21215
LEMAIRE (L.) . 21253
LENOBLE (E.).. 21238
LÉVY-SALVADOR (P.) 21248
LOT (F.) 21246
LOUIS (J.) JEUNE 21291
LUBIMENKO (V. N.). 21246
LUCIUS (M.)... 21352

M

MABIT (J.) 21293
MAGNÉ (A.) 21259
MARGIVAL (F.) 21256-21257, 21343
MARIN (P.) ... 21316
MARTEL (H.) .. 21332 21334
MAURER (P.)... 21202
MERAD BEN ALI OULD ABDELKADER 21337
MARIGOUX (A.). 21284
MINVIEILLE (G.). 21262
MIRIMONDE (A. DE) 21280
MOLLARD (M.).. 21209
MONGES (A.)... 21311
MONTESSUS DE BALLORE (R. DE)......... 21180
MOREAU (A.) .. 21275
MOREAU (E.) .. 21344
MOREAU (G.) .. 21242
MULLER (A.) .. 21208

N

NAMIAS (A.).... 21301
NIESSEL (Général) 21235
NITTI (F.) 21289
NOGARO (B.)... 21299

P

PAJOT-LACAZE (R.) 21267
PALEWSKI (J. P.) 21272
PANEL......... 21258
PARODI (H.) ... 21266
PASCAL (F.) ... 21324
PÉCAUCHE (P.). 21281
PELLERIN (G.). 21338
PERQUEL (J.) . 21294
PERREAU (C.) .. 21297
PFANHAUSER (Dr W.) 21241
PIC (P.) 21313
PICARD (E.).... 21135
PINI (A.) 21303
PIQUE (R.) 21245
POINCARÉ (Raymond) 21290
POITEUX (B.) .. 21287
POMIANE POZERSKI (Dr DE) 21332

BULLETIN D'ABONNEMENT

Je, soussigné (1) ....

....

....

déclare souscrire **un abonnement** *d'un an aux* NOUVEAUX LIVRES SCIENTIFIQUES & INDUSTRIELS, *à partir du* ....
au prix de .... *francs* (2) *— que je vous remets ci-joint par mandat-poste, billets de banque, chèque sur Paris* (3) *— que je verse à votre compte de chèques postaux Paris 7545* (3) *— que je vous prie de porter à mon compte-courant* (2).

SIGNATURE

(1) Nom, qualité et adresse (écrire lisiblement).
(2) Le prix de l'abonnement (France 12 fr., Étranger 20 fr.) est porté en compte trimestriel pour les clients de la Librairie Dunod.
(3) Rayer les modes de règlement non adoptés.

LES NOUVEAUX LIVRES SCIENTIFIQUES & INDUSTRIELS

Bibliographie trimestrielle avec 2 tables alphabétiques

92, Rue Bonaparte
PARIS-VIe



SOCIÉTÉ À RESPONSABILITÉ LIMITÉE AU CAPITAL DE 1.200.000 FRANCS

ÉDITEUR

Chèq. Post. Paris 7545
R. du C. Seine 229.970 B

Toutes les personnes qui cherchent un livre sur un sujet déterminé connaissent les difficultés éprouvées pour obtenir des renseignements utiles. Même en s'adressant à plusieurs intermédiaires, on ne réussit qu'à s'encombrer de catalogues classés différemment et ne donnant que des titres d'ouvrages sans précision sur les matières étudiées.

La revue bibliographique « **LES NOUVEAUX LIVRES SCIENTIFIQUES & INDUSTRIELS** », qui paraît tous les 3 mois, évite ces inconvénients en donnant des renseignements détaillés et classés méthodiquement sur les nouveaux livres techniques et industriels publiés par **tous les éditeurs français.**

Indépendamment du titre de l'ouvrage, des nom et qualité de son auteur, de son prix, du format et du nombre de ses pages, elle contient — chose essentielle — **un sommaire** donnant une idée exacte du sujet traité. Dans chaque livraison, deux tables alphabétiques — l'une des matières, l'autre des noms d'auteurs — permettent de trouver les ouvrages sur un sujet déterminé ou ceux dont le nom seul de **l'auteur est connu.**

Cette revue indique également pour chaque livre le nombre qui le caractérise dans la **classification décimale** de l'Institut International de Bibliographie ; en outre, **l'impression étant faite au recto seulement**, les sommaires peuvent être collés sur **fiches** et, en disposant celles-ci dans l'ordre de la classification décimale, on peut trouver en quelques secondes les fiches, groupées, des ouvrages publiés sur une matière déterminée, quelque spéciale qu'elle soit.

Cette publication, unique en son genre, est donc d'une utilité incomparable pour le technicien. (Abonnement annuel : France **12 fr.** Étranger **20 fr.**)

Aux avantages énumérés, il convient d'ajouter que, tous les 5 ans, la collection des numéros des « **NOUVEAUX LIVRES SCIENTIFIQUES & INDUSTRIELS** » est réunie en un volume précédé d'une table récapitulative en deux parties comprenant : l'une les sujets traités, l'autre les noms d'auteurs. Les collections suivantes sont disponibles :

Le soussigné ....

Qualité ....

Adresse ....

désire recevoir **à titre gracieux** :

— (1) **le service** de la **BIBLIOGRAPHIE DES SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE** — éditée par la librairie Dunod — qui donne, huit fois par an, les titres de tous les livres techniques récemment parus en France, des principaux ouvrages de même nature publiés à l'étranger, ainsi que les sommaires des revues scientifiques françaises les plus réputées.

— (1) **les extraits du catalogue de la Librairie Dunod** donnant les sommaires des ouvrages se rapportant aux sujets suivants :

1. Organisation industrielle et commerciale. Comptabilité. Finances. Economie. Législation. Hygiène.
2. Enseignement général et professionnel.
3. Mécanique.
4. Automobilisme. Aéronautique.
5. Electricité. Télégraphie. Téléphonie.
6. Chimie et analyse chimique.
7. Industries diverses. Agriculture.
8. Architecture. Travaux Publics. Construction.

8*bis*. Hydraulique. Distributions d'eau. Assainissement des villes. Navigation. Ports.

9. Chemins de fer et tramways.
10. Géologie. Mines.

10*bis*. Métallurgie. Pierres et métaux précieux.

Le ....*193*....

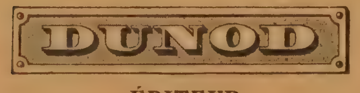
Signature

(1) Ne laisser subsister que les mentions qui conviennent et marquer d'une croix les extraits du catalogue désirés

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

CARTE POSTALE

Côté exclusivement réservé à l'adresse



ÉDITEUR

92, Rue Bonaparte

PARIS-VIe

92, Rue Bonaparte, PARIS (VIe)  Tél.: LITTRÉ 33-43, 33-44, 33-45
Chèques postaux: Paris 7545 Reg. du Com. Seine 229-970 B.
SOCIÉTÉ A RESPONSABILITÉ LIMITÉE, AU CAPITAL DE 1.200.000 FRANCS

(Voir au bas de la quatrième page l'extrait des conditions générales de vente.)

Quelques ouvrages du catalogue compris dans le

FASCICULE 8

CONSTRUCTION, TRAVAUX PUBLICS

Le fascicule 8 du catalogue Dunod contenant tous les ouvrages sur la Construction et les Travaux Publics avec leurs sommaires complets est envoyé franco sur demande.

AGENDA BATIMENT – AGENDA TRAVAUX PUBLICS
AGENDA BÉTON ARMÉ

A l'usage des architectes, ingénieurs, entrepreneurs, conducteurs, agents voyers, métreurs et commis de travaux.

Chaque volume 10×15, 1930. (280 gr. environ). Relié pégamoïd . . . . **20 fr.**

AIDE-MÉMOIRE

DES INGÉNIEURS, ARCHITECTES, ENTREPRENEURS, CONDUCTEURS DE TRAVAUX, AGENTS VOYERS, DESSINATEURS, etc.

PARTIE PRATIQUE

FORMULES, TABLES ET RENSEIGNEMENTS USUELS

par **J. CLAUDEL**

12e édition, entièrement refondue

par

O. ROUX, Ing. des Ponts et Chaussées — **A. CARNEL**, Ing. des Ponts et Chaussées

Mécanique : Unités. Machines. Résistance des matériaux. — *Hydraulique* : Récepteurs : moteurs, roues, turbines, machines élévatoires. Pompes. Machines à colonne d'eau. Ascenseurs, crics, vérins. — *Distributions d eau.* — *Assainissement* : Egouts. Epandange. — *Physique industrielle* : Propagation de la chaleur. Mesure des températures. Compressibilite. Chaleur spécifique. Thermodynamique. Froid industriel. Ventilation. Machines pneumatiques. Compresseurs. Eclairage. Séchage. Métallurgie. Explosifs. Air liquide. — *Electricité* : Accumulateurs. Electrolyse. Magnétisme. Téléphonie. Machines électriques. Alternateurs. Transformateurs. Distribution de l'électricité. Télégraphie. T. S. F. — *Routes et canaux* : Profils. Raccordements. Cubature des terrasses. Routes. Chaussées. Canaux. Ecluses. Ouvrage d'art. — *Ponts* : En maçonnerie, métalliques, suspendus, en arc. Ponts en béton armé. — *Tunnels.* — *Murs de soutènement.* — *Moteurs à vapeur et à gaz* : Foyers. Chaudières. Machines à vapeur. Moteurs à gaz. Gazogènes. Moteurs à essence et alcool. Moteurs Diesel. Navigation à vapeur. — *Chemins de fer* : Bâtiments. Voie. Traction et matériel roulant. Métropolitains. Tramways. Automobiles. — *Architecture* : Réparations locatives. Constructions rurales. Maçonneries. Fondations. — *Lois et Décrets.*

2 volumes 14×22, ensemble, xxvi-2.296 p., 1.613 fig., 1930 (2.800 gr.). Reliés . **235 fr.**

RAPPEL : **Partie théorique.** 2 volumes, 14×22, ensemble, viii-1858 p., 1.710 fig. et 2 planches, 1913 (2.430 gr.). Relié **106 fr. 50** Broché . . . . **86 fr. 50**

Nouvelle Édition du

DICTIONNAIRE ADMINISTRATIF DES TRAVAUX PUBLICS

de **A. DEBAUVE**

par **L. COURCELLE**

sous le titre

TRAITÉ ADMINISTRATIF DES TRAVAUX PUBLICS

Des travaux publics. Organisation. Classification. Travaux neufs, de grosses réparations, d'entretien. Marchés. Modes d'exécution. Expropriation. Dommages causés par l'exécution des travaux. Condition juridique des grands ouvrages affectés à l'usage du public. Voirie terrestre. Régime des eaux. Voirie fluviale. Rivages de la mer. Ports maritimes. Forces hydrauliques. Distributions et transports d'énergie électrique. Chemins de fer. Mines, minières, tourbières, carrières. Appareils à vapeur autres que ceux placés à bord des bateaux. Complément à jour au 15 Octobre 1927.

2 vol. 16×25, ensemble xxviii-1472 p., 1927 (2.330 gr.) **et un complément** 16×25, xxiv-476 p., 1928 (770 gr.), à jour au 15 Octobre 1927. Prix de l'ouvrage complet en 3 volumes. Relié, **282** fr. Broché . . . . **250 fr.**

3958. — **Paris.** — **Imp. Hemmerlé, Petit et Cie** (3-1931).

22e Année — N° 18. — 15 Septembre 1930.

ABONNEMENT ANNUEL : France : 125 fr Étranger : 180 fr
Prix spécial pour les pays ayant accepté l'échange du tarif postal réduit . 164 fr

LA Technique Moderne

Revue Universelle des Sciences appliquées à l'Industrie

Paraissant le 1er et le 15 de chaque mois

Directeur-Rédacteur en chef : Georges BOURREY

SOMMAIRE DU NUMÉRO DU 15 SEPTEMBRE 1930

TRAVAIL DU BOIS — **L'atelier de menuiserie dans la carrosserie automobile**, par A. ANTONI, Ingénieur des Arts et Manufactures (p. 617)

INDUSTRIE TEXTILE — **La fabrication de la soie artificielle**, par H. L. DE LEEUW, Docteur ès sciences (p. 623)

TRAVAUX PUBLICS ET CONSTRUCTION. — **Le nouveau port aérien de Munich-Oberwiesenfeld**, par Émile LEPOINTE, Professeur à l'École technique supérieure de Sarrebrück (p. 627)

LA SITUATION ACTUELLE DE L'INDUSTRIE FRANÇAISE. — **Le mouvement des prix de gros en France depuis 1920**, par H. BUNLE (p. 632)

REVUE DOCUMENTAIRE FRANÇAISE ET ÉTRANGERE. — **Notes, Analyses, Extraits, Comptes rendus.** — Le système de récupérateur Chapman-Stein pour fours pits et fours à réchauffer (p. 635). — La réduction du temps de distillation dans les fours à coke (p. 635). — Le cinquantenaire du rail à gorge (p. 635). — La station de pompage de Niederwartha (p. 636). — Les moteurs à deux temps pour avions, par Gaston-Louis CAVALIERI, ancien Directeur technique de la Société S. A. F. I. M. à Florence (p. 639). — Joints en acier doux pour canalisations de vapeur à 95 kg/cm² (p. 641). — Un four Talbot de 250 T (p. 642). — Essais de vieillissement sur l'acier moulé (p. 643). — Le ponton d'accostage pour paquebots de Tilbury (p. 644).

Travaux des sociétés scientifiques et industrielles — Le XXXVe Congrès de la Bunsen Gesellschaft für angewandte physikalische Chemie (Heidelberg, 28 mai-1er juin 1930) (p. 645). — Un nouveau composé pour la fabrication des parafoudres (p. 645). — Le nouveau parafoudre autovalve (p. 646). — La résistance à chaud de l'acier moulé comportant de faibles additions de nickel et de molybdène (p. 647). — Un perfectionnement nouveau pour la prise des stéréoradiographies (p. 647.) — L'enregistrement des phénomènes rapides au moyen de l'oscillographe cathodique dans l'air (p. 647). — Les ponts en béton armé de très grande portée (p. 648)

ANNEXE. — La vie des sociétés industrielles (p. 2 et 4). — **Documentation bibliographique** : Index des principaux articles des Revues et Périodiques (p. 6, 8 et 10). — Liste des principaux ouvrages parus en juillet 1930 (p. 10). — Analyses d'ouvrages récemment parus (p. 10 et 12). — Petites informations (p. 12, 20 et 22).

Renseignements économiques. — **La Quinzaine Économique**. Cours commerciaux et industriels (p. 15 et 18). — Débouchés commerciaux (p. 22 et 24). — Formations de Sociétés (p. 24). — Adjudications (p. 24). — Index des annonces (p. 26, 28 et 30) — Petites annonces (p. 32)

PARIS (6e) DUNOD ÉDITEUR

Chèques postaux : Paris 7545

RÉDACTION (Téléphone : Littré 17-89) — 92, Rue Bonaparte, PARIS-VIe — ADMINISTRATION (Tél. Littré 43-43)

La présente livraison est vendue séparément : 6 francs

Chaque demande de changement d'adresse doit être accompagnée de 0 fr. 80 en timbres-poste et doit nous parvenir huit jours avant la date de la première livraison à envoyer à la nouvelle adresse.

PRINCIPAUX ARTICLES PUBLIÉS EN 1930
dans " LA TECHNIQUE MODERNE "

Le matériel moderne de l'électrotechnique. — La traction électrique sur les chemins de fer. — La cellule photo-électrique et ses applications. — Les progrès récents de la construction en béton. — Les grands ouvrages français. — Les machines-outils de la grande métallurgie. — Examen microscopique des minerais metalliques. — Le système Loffler à circulation de vapeur et l'économie moderne de la vapeur. — La mesure de la fatigue des tuyauteries de vapeur à haute pression. — Les dispositifs de lutte contre l'incendie. — Calcul et construction des pompes pour presses hydrauliques. — La fabrication de la soie artificielle. — L'application des méthodes d'organisation scientifique du travail. Un exemple pratique. — Les machines à bois modernes à grande production. — Le chauffage central aux huiles lourdes. — Le chauffage industriel aux huiles lourdes. — La suralimentation des moteurs à combustion interne.

La soie artificielle : filage de la viscose, teinture de la soie. — La protection des métaux ferreux par les revêtements métalliques et par voie chimique. — Les tolérances de fabrication des filetages. — L'atelier de menuiserie dans la carrosserie automobile. — Un nouveau principe dans la carburation. Le carburateur inversé Holley à courant descendant. — La mécanisation du travail de bureau. Innovations récentes. — Les récents perfectionnements de la locomotive à vapeur à pistons. — Les calibres vérificateurs des filetages. — Les moteurs Diesel d'aviation. — Les grands itinéraires aériens. Les cartes actuelles. — Les procédés modernes de taille des engrenages. — L'évolution des constructions navales. — Le poste à 60.000 volts de Soisy-sous-Montmorency. — Emboutissage des tôles d'aluminium. — Refroidissoirs modernes pour trains à petits fers. — Le chauffage des mélangeurs avec du gaz de hauts fourneaux. — L'écrouissage et les propriétés physiques des métaux. — Le VI[e] Congrès international des Mines, de la Métallurgie et de la Géologie appliquée (Liége, 22-28 juin 1930). — Le III[e] Congrès de l'Union internationale des Producteurs et Distributeurs d'énergie électrique. — Le nouveau port aérien de Munich-Oberwiesenfeld. — Le mouvement des prix de gros en France depuis 1920. — La liaison des banques et des grandes entreprises privées au réseau postal par tubes pneumatiques. — Le potentiel d'oxydo-réduction. — Le III[e] Congrès de l'Industrie du Gaz en France. — Les moyens de défense contre les incendies de réservoirs d'hydrocarbures. — Le bassin houiller de Basse-Normandie. — Congrès de l'Association technique maritime.

Les machines à fabriquer les cigarettes. Les machines à enveloppement. — Le pont-route de Cologne à Mülheim. — Le renforcement du pont de Holt-Fleet, sur la Severn. — Le bassin houiller de Brive. — Le IX[e] Salon de la Machine agricole. — Le réseau parisien des avertisseurs d'incendie. — L'aménagement du Rhin. L'usine de Kembs. — L'automobile en France en 1930. — **Le Congrès du Carbone végétal.**

EXTRAIT DU PROGRAMME DE "LA TECHNIQUE MODERNE" POUR 1931

Le matériel d'entreprise et de travaux publics. — Les grands travaux de construction. — Les plus récentes Centrales thermiques et hydrauliques. — La carbonisation à basse température. — Le matériel moderne de mines. Electrification du fond. — Les presses hydrauliques et mécaniques. — Les appareils de transport pneumatiques. — Le matériel industriel colonial. — L'urbanisme. — Les laminoirs modernes. — Les récents progrès de l'électrotechnique. — Le raffinage du pétrole. — L'industrie sucrière. — Les industries maritimes. — Les vibrations dans les machines à grande vitesse. — Les métaux spéciaux. — Les nouveaux alliages. — La lutte contre la corrosion. — Les nouveaux procédés de construction en béton armé. — L'électrification rurale. — Les perfectionnements modernes des turbines hydrauliques et de leurs accessoires. — L'état actuel de la télévision. — Les fabrications en grande série. — Les moteurs à huile lourde. — Les gazogènes et leurs applications à la traction. — L'application des récents progrès de la chimie à l'industrie. — Le transport du gaz à grande distance. — Les houillères et les industries chimiques.

Monsieur,

Comme tous les Industriels et Ingénieurs, vous avez besoin de vous tenir au courant des perfectionnements apportés dans les différentes branches de l'Industrie, par une documentation sûre, pratique, concise.

Les modifications profondes dans la technique des fabrications et dans les méthodes de production, l'instabilité des prix des matières premières, les difficultés de la main-d'œuvre obligent les techniciens à disposer périodiquement d'un compte rendu pratique de tout ce qui se fait de nouveau dans l'Industrie.

Dans cet ordre d'idées, nous nous permettons d'attirer votre attention sur "**LA TECHNIQUE MODERNE**" *qui, de l'avis de tous, est la* **première Revue française de technique générale.** *Bimensuelle,* " **LA TECHNIQUE MODERNE** " *apporte à l'Industrie,* **à intervalles rapprochés,** *toute la documentation à la fois scientifique, technique et économique dont elle a besoin pour se tenir régulièrement au courant des progrès réalisés tant en France qu'à l'étranger.*

Depuis la nouvelle orientation donnée à cette publication, *ses livraisons bimensuelles renferment des ETUDES ORIGINALES d'intérêt pratique, des INFORMATIONS concernant toutes les nouveautés des différentes industries, une REVUE MÉTHODIQUE des travaux des Sociétés Scientifiques et Industrielles, une ANALYSE des publications françaises et étrangères dans le domaine scientifique et technique, un INDEX SYSTÉMATIQUE donnant la bibliographie des périodiques techniques du monde entier.*

Pour vous permettre d'apprécier notre revue, nous nous offrons à vous adresser gratuitement une livraison spécimen si vous voulez bien nous retourner, complété, le bulletin que vous trouverez au verso.

LA DIRECTION.

BULLETIN D'ABONNEMENT - DEMANDE DE SPÉCIMEN

à retourner à DUNOD, Société à responsabilité limitée au capital de 1.200.000 francs
Éditeur, 92, Rue Bonaparte, PARIS (6e)
Registre du Commerce : Seine N° 229.970 B

Je, soussigné, (1) ....

....

....

— *désire recevoir gratuitement une* livraison spécimen *de* "LA TECHNIQUE MODERNE" (2)

— *déclare souscrire à* "LA TECHNIQUE MODERNE" *un abonnement d'*(3) ....

qui partira du .... *au prix de* (3) .... *fr. que je verse à votre compte de Chèques postaux* Paris 7545 (4) — *que je vous envoie ci-joint* (4) — *que je vous prie de recouvrer par la poste* (4)(5).

A ...., *le* *193*

SIGNATURE

(1) Nom et adresse très lisibles.
(2) Si l'on désire recevoir une livraison spécimen, rayer la formule relative à l'abonnement.
(3) Un an (24 livraisons) : France, **125** fr. ; Etranger, **180** fr. (Prix spécial : **164** fr. pour les pays ayant accepté l'échange du tarif postal réduit). La durée des abonnements est en principe d'un an et ils se terminent à fin décembre ; exceptionnellement, ils peuvent être notés dans le cours d'une année et jusqu'au 31 décembre à un prix proportionnel à leur durée.
(4) Ne laisser subsister que la mention qui convient.
(5) Sur demande, le recouvrement du montant de l'abonnement est effectué en France, par les soins de la poste, moyennant un supplément de 2 fr. 50.

PARIS. — G. LEROY, IMP. G. a. ANC. COMÉDIE.

J'ai examiné plusieurs échantillons de mortier que j'ai prélevés moi-même sur cet ouvrage.

Voici les résultats :

Les mortiers ont été traités directement sans séparation des parties fines.

TABLEAU VI

	Kilom. : 77,500 — ÉLÉVATION Rive droite Chaux marque A	Kilom. : 77,500 — ÉLÉVATION Rive gauche Chaux marque B	Kilom. : 77,500 — FONDATIONS Rive gauche Chaux siliceuse Vallée du Rhône	Kilom. : 72,500 — MUR EN RETOUR Chaux alumineuse marque B
Silice	48,30	33,70	43,45	27,70
Alumine + Fer	5,50	4,72	4,95	3,83
Chaux	22,25	30,50	24,20	33,75
Magnésie	0,79	0,78	0,88	0,98
Acide sulfurique	1,42	3,60	5,01	2,40
Acide carbonique et Eau	20,30	25,20	20,60	30,05
Pertes et non dosés	1,44	1,50	0,91	1,29
	100,00	100,00	100,00	100,00

Les teneurs en acide sulfurique sont considérables, tandis que celles en magnésie sont relativement faibles.

§ 2. — EXPÉRIENCES SUR LA DÉCOMPOSITION DES MORTIERS PAR LES EAUX SULFATÉES

Les phénomènes de décomposition ont été étudiés au point de vue chimique, et dans le but d'avoir des résultats plus rapides, ce sont des mortiers maigres (un quart ou un cinquième en poids) confectionnés avec du sable très fin (sable de dunes inférieur à $0^{mm},5$) qui ont été mis en essai par immersion dans des solutions très concentrées : 1° solution saturée de sulfate de chaux et solution à 12 pour 1.000 de sulfate de magnésie anhydre; 2° eau de mer artificielle à laquelle nous avions donné la composition suivante :

Chlorure de sodium	30 g.	Pour 1 litre d'eau.
Sulfate de magnésie cristallisé	6 g.	
Chlorure de magnésium hydraté	6 g.	
Sulfate de chaux hydraté	2 g.	
Bicarbonate de potasse	2 dg.	

On objectera que ce ne sont pas les conditions normales de la pratique, que lorsqu'on se trouve en présence d'eaux sulfatées on emploie de bons sables et des dosages élevés. Ceci est parfaitement exact, mais il s'agissait de mettre en évidence l'aptitude des liants à la décomposition, aptitude qui est une propriété intrinsèque de leur composition chimique. Il convenait donc de se placer dans les conditions les plus favorables pour la faire apparaître.

Cette aptitude a été étudiée avec des liants ayant des compositions différentes : les uns siliceux, les autres ayant 8 0/0 d'alumine; certains calcaires, d'autres à fort indice.

Nous en sommes venus à étudier l'action de pouzzolanes artificielles et accessoirement l'action du stéarate de chaux qui augmente l'imperméabilité des mortiers.

Comme pouzzolanes nous avons utilisé :

1° Un produit obtenu par fusion et granulé dans l'eau froide. Ce produit avait la composition suivante qui est, avec un peu de fer en plus et un peu de soufre en moins, celle de certains laitiers de hauts fourneaux :

Silice	32,70 0/0
Alumine	7,84
Peroxyde de fer	7,66
Chaux	47,00
Magnésie	1,85
Acide sulfurique	0,34
Acide carbonique	1,14
Eau et matières volatiles	0,46
Pertes et non dosés	1,01
	100,00 0/0

2° Une argile kaolinique, moyennement réfractaire (à cause du fer qu'elle contenait) et déshydratée.

Les travaux de Vogt sur les argiles ont montré que cette déshydratation de la kaolinite $2SiO^2,Al^2O^3,2H^2O$, qui est une partie constitutive de toutes les argiles devait se faire aux environs de 700° pour donner un produit facilement attaquable à l'acide chlorhydrique, ce qui en explique l'action pouzzolanique.

Depuis, Sokolof a montré que cette déshydratation est une véritable destruction de la molécule de kaolinite provoquée par la séparation de l'eau de constitution, puisqu'à chaque température les quantités d'eau mises en liberté représentent bien 2 molécules

d'eau pour une d'Al^2O^3 solubilisée; et que cette déshydratation commencée à 500°, est pratiquement complète à 800°.

Nous avons opéré de la façon suivante : les mortiers étaient gâchés à consistance plastique, moulés en cubes de 50 centimètres carrés de surface ; les cubes étaient conservés vingt-quatre heures ou quarante-huit heures au plus à l'air sec, puis démoulés ensuite et, ou immergés dans la solution à étudier, ou immergés dans l'eau de rivière courante dans laquelle ils étaient maintenus un mois à l'abri de toute carbonatation avant d'être définitivement placés dans les solutions décomposantes.

Il y a donc lieu de noter que les cubes conservés ainsi pendant un mois ne devraient pas être carbonatés et qu'il n'est pas étonnant de trouver que, dans certains cas, l'aptitude à la décomposition ait augmentée en n'immergeant pas les cubes immédiatement.

Les éprouvettes étaient plongées dans la solution à étudier jusqu'aux deux tiers de leur hauteur et les bassins d'immersion étaient placés dans une salle maintenue à 17-18°, température qui facilitait la filtration ou l'évaporation des solutions salines par le haut des cubes.

I. **Action du sulfate de chaux.** — L'eau saturée de sulfate de chaux paraît être l'agent naturel le plus actif des décompositions [1]. Et aucun des ciments Portland lents ou prompts que nous avons essayés, quelle que soit sa finesse de mouture et quelle que soit sa composition chimique, n'a résisté six ans à l'action de cette solution saturée. La date d'immersion agit tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre.

Les chaux, même les chaux siliceuses les plus réputées à la mer, sont décomposées rapidement (tableau VII, *fig.* 13, pp. 44 et 47).

[1] L'emploi dans le mortier de sables gypseux surtout très fins présente les mêmes dangers.

TABLEAU VII.

DÉSIGNATION DES PRODUITS MIS EN ESSAI	DOSAGE	IMMERSION après	IMMERSION DANS LA SOLUTION SATURÉE DE SULFATE DE CHAUX					
			Traces de décomposition 0	Très légèrement décomposé 1	Légèrement décomposé 2.	Assez décomposé 3	Fortement décomposé 4	Disparu 5
Ciment siliceux surcuit	1 : 4	1 mois	6 mois	7 mois	23 mois	36 mois	42 mois	60 mois
Ciment siliceux cuisson ordinaire (v. *fig.* 13, p. 47)	1 : 4	1 mois	10 —	12 —	36 —	42 —	68 —	**71** —
Autre ciment siliceux cuisson ordinaire	1 : 4	48 heures	12 —	13 —	**32** —	» —	» —	» —
Autre ciment siliceux cuisson ordinaire	1 : 4	1 mois	10 —	12 —	36 —	décomposition stationnaire		
Ciment siliceux à hautes résistances	1 : 4	1 mois	6 —	7 —	23 —	36 mois	48 mois	**71** mois
Ciment à grand excès de silice, mouture normale	1 : 4	1 mois	8 —	10 —	36 —	décomposition stationnaire		
Ciment à grand excès de silice, fine mouture	1 : 4	1 mois	8 —	10 —	36 —	décomposition stationnaire		
Ciment artificiel du commerce à 8 0/0 d'alumine	1 : 4	1 mois	2 —	3 —	5 —	14 mois	23 mois	36 mois
Autre ciment artificiel du commerce à 8 0/0 d'alumine	1 : 4	1 mois	6 —	7 —	8 —	12 —	16 —	18 —
Autre ciment artificiel du commerce à 8 0/0 d'alumine	1 : 4	24 heures	5 —	6 —	14 —	18 —	22 —	28 —
Autre ciment artificiel du commerce à 8 0/0 d'alumine	1 : 4	48 heures	7 —	8 —	16 —	22 —	28 —	33 —
Autre ciment artificiel du commerce à 8 0/0 d'alumine	1 : 4	48 heures	9 —	10 —	20 —	25 —	32 —	44 —
Autre ciment artificiel du commerce à 8 0/0 d'alumine	1 : 4	24 heures	12 —	14 —	33 —	38 —	42 —	48 —
Ciment artificiel du commerce à 8 0/0 d'alumine fabriqué spécialement pour éviter les décompositions	1 : 4	48 heures	12 —	15 —	décomposition stationnaire			
Ciment prompt du commerce	1 : 4	48 heures	» —	» —	**55** mois	» —	» —	» —
Autre ciment prompt du commerce	1 : 4	48 heures	» —	**55** —	» —	» —	» —	» —
Chaux siliceuse surcuite	1 : 4	1 mois	4 —	6 —	15 —	23 —	36 —	60 —
Chaux siliceuse cuisson ordinaire	1 : 4	1 mois	12 —	13 —	23 —	38 —	48 —	58 —

N. B. — Tous les ciments siliceux dont nous parlons avaient moins de 2 0/0 d'alumine.

Les chiffres gras indiquent que l'essai a été arrêté à cette époque.

L'addition de stéarate de chaux qui rend les mortiers plus imperméables s'est montrée insuffisante pour éviter les décompositions (tableau VIII, *fig.* 14, p. 47).

TABLEAU VIII.

DÉSIGNATION DES PRODUITS MIS EN ESSAI	DOSAGE	IMMERSION après	IMMERSION DANS LA SOLUTION SATURÉE DE SULFATE DE CHAUX: Traces de décomposition 0	Très légèrement décomposé 1	Légèrement décomposé 2	Assez décomposé 3	Fortement décomposé 4	Disparu 5
Ciment siliceux cuisson ordinaire sans addition.....	1 : 4	1 mois	10 mois	12 mois	36 mois	décomposition stationnaire		
Ciment siliceux cuisson ordinaire additionné de 5 0/0 de stéarate de chaux (v. *fig.* 14).....................	1 : 5	24 heures	» »	» »	» »	» »	**45** mois	» »
Chaux siliceuse cuisson ordinaire sans addition.....	1 : 4	1 mois	12 mois	13 mois	23 mois	38 mois	48 —	58 mois
Chaux siliceuse cuisson ordinaire additionné de 5 0/0 de stéarate de chaux...............	1 : 5	24 heures	1 —	2 —	9 —	15 —	22 —	41 —
			Les chiffres gras indiquent que l'essai a été arrêté à cette époque.					

L'augmentation de l'indice par la silice seule n'a pas suffi non plus pour éviter toutes les décompositions, quoique ayant donné un résultat intéressant (tableau IX, *fig.* 15, p. 47).

TABLEAU IX.

DÉSIGNATION DES PRODUITS MIS EN ESSAI	DOSAGE	IMMERSION après	IMMERSION DANS LA SOLUTION SATURÉE DE SULFATE DE CHAUX: Traces de décomposition 0	Très légèrement décomposé 1	Légèrement décomposé 2	Assez décomposé 3	Fortement décomposé 4	Disparu 5
Ciment à grand excès de silice (indice 0,50) (v. *fig.* 15)	1 : 4	1 mois	8 mois	10 mois	36 mois	décomposition stationnaire		

Mais l'addition de pouzzolane déshydratée diminue sensiblement l'action décomposante de la solution de sulfate de chaux et dans certains cas l'arrête, tout au moins pendant les premières années, car nous nous empressons de faire remarquer que, du fait qu'un produit est six ans sans se décomposer, cela ne veut pas dire qu'il soit toujours indécomposable.

Comme on le verra en outre dans le tableau ci-dessous, la proportion d'eau de gâchage, tout au moins pour le mélange avec pouzzolane, ne paraît pas avoir d'influence (tableau X).

Tableau X.

DÉSIGNATION DES PRODUITS MIS EN ESSAI	DOSAGE	IMMERSION après	IMMERSION DANS LA SOLUTION SATURÉE DE SULFATE DE CHAUX					
			Traces de décomposition 0	Très légèrement décomposé 1	Légèrement décomposé 2	Assez décomposé 3	Fortement décomposé 4	Disparu 5
Ciment artificiel du commerce à 8 0/0 d'alumine n° 1	1 : 4	24 heures	5 mois	6 mois	14 mois	26 mois	33 mois	38 mois
1 partie ciment n° 1, 3 parties argile déshydratée	1 : 4	24 —	intact					
1 partie ciment n° 1, 3 parties argile déshydratée	1 : 4	1 mois	14	15 —	décomposition stationnaire			
Autre ciment artificiel à 8 0/0 d'alumine n° 2	1 : 4	48 heures	7 —	8 —	12 —	17 —	23 —	27 —
1 partie ciment n° 2 ci-dessus, 2 parties argile déshydratée	1 : 4	48 —	8	9 —	décomposition stationnaire			
1 partie ciment n° 2, 2 parties argile déshydratée	1 : 4	1 mois	intact					
1 partie ciment siliceux haute résistance, 1 partie argile déshydratée gâchée avec 35 0/0 d'eau	1 : 4	48 heures	intact					
1 partie ciment siliceux haute résistance, 1 partie argile déshydratée gâchée avec 30 0/0 d'eau	1 : 4	48 —	intact					
1 partie ciment siliceux, 1 partie argile déshydratée gâchée avec 14 0/0 d'eau	1 : 4	48 —	intact					

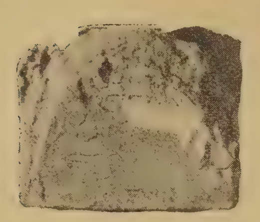


Fig. 13 (tableau VII).

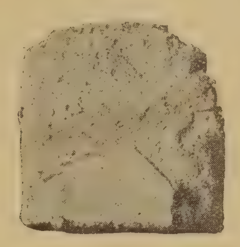


Fig. 14 (tableau VIII).

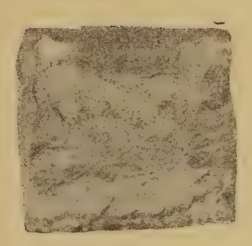


Fig. 15 (tableau IX).

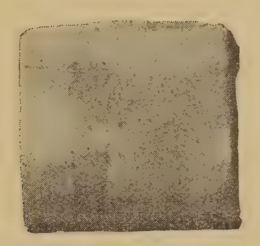


Fig. 16 (tableau XII).

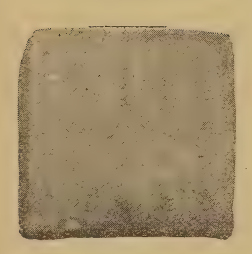


Fig. 17 (tableau XII).



Fig. 18 (tableau XIII).

L'argile déshydratée avait été triturée très finement avec le ciment lui-même dans les appareils de trituration, la finesse de mouture des pouzzolanes, qu'elle qu'en soit leur nature, étant une des conditions de leur activité.

Voici d'ailleurs quelques expériences tout à fait concluantes (tableau XI) à ce sujet :

TABLEAU XI.

DÉSIGNATION DES PRODUITS MIS EN ESSAI	SOLUTIONS D'IMMERSION	
	Solution saturée de sulfate de chaux	Solution à 12 0/00 de sulfate de magnésie anhydre
1 partie ciment siliceux fine mouture, 2 parties argile déshydratée triturée fin.	Intact au bout de 30 mois.	Intact au bout de 30 mois.
1 partie ciment siliceux fine mouture, 2 parties argile déshydratée triturée grossièrement.	Décomposition nettement visible à 30 mois.	Disparu au bout de 7 mois.
1 partie ciment siliceux fine mouture, 1 partie argile déshydratée triturée fin.	Intact au bout de 30 mois.	Intact au bout de 30 mois.
1 partie ciment siliceux fine mouture, 1 partie argile déshydratée triturée grossièrement.	Disparu au bout de 24 mois.	Disparu au bout de 4 mois.
1 partie ciment alumineux mouture moyenne, 2 parties argile déshydratée triturée fin.	Intact au bout de 30 mois.	Décomposition moyenne au bout de 30 mois.
1 partie ciment alumineux mouture moyenne, 2 parties argile déshydratée triturée grossièrement.	Intact au bout de 30 mois.	Disparu au bout de 4 mois.
1 partie ciment alumineux grosse mouture, 1 partie argile déshydratée triturée fin.	Intact au bout de 30 mois.	Intact au bout de 30 mois.
1 partie ciment alumineux mouture moyenne, 1 partie argile déshydratée triturée grossièrement.	Intact au bout de 30 mois.	Disparu au bout de 5 mois.
1 partie ciment alumineux grosse mouture, 2 parties argile déshydratée triturée fin.	Intact au bout de 30 mois.	Intact au bout de 30 mois.
1 partie ciment alumineux grosse mouture, 2 parties argile déshydratée triturée grossièrement.	Disparu au bout de 30 mois.	Disparu au bout de 24 mois.
1 partie ciment alumineux grosse mouture, 1 partie argile déshydratée triturée fin.	Intact au bout de 30 mois.	Intact au bout de 30 mois.
1 partie ciment alumineux grosse mouture, 1 partie argile déshydratée triturée grossièrement.	Disparu après 15 mois.	Décomposition moyenne au bout de 30 mois.

Il y a lieu de noter que les résistances à l'écrasement obtenues avec des mélanges de ciment siliceux et d'argile déshydratée dans la proportion de 1 partie de ciment pour 1 partie d'argile sont meilleures que celles données par le ciment pur ; par suite il est possible qu'avec ces ciments on puisse réduire la proportion de ciment jusqu'à 1 parties de ciment pour 2 d'argile.

II. **Action du sulfate de magnésie.** — L'action de la solution à 12 pour 1.000 de sulfate de magnésie anhydre est différente de celle de la solution saturée de sulfate de chaux.

Les produits siliceux n'ayant pas plus de 2 0/0 d'alumine, même les chaux, ont une tenue au sulfate de magnésie bien meilleure que celles qu'elles ont au sulfate de chaux (tableau XII, *fig.* 16 et 17, 47).

Tableau XII.

DÉSIGNATION DES PRODUITS MIS EN ESSAI	DOSAGE	IMMERSION	SOLUTIONS D'IMMERSION											
			SOLUTION A 12 0/00 DE SULFATE DE MAGNÉSIE ANHYDRE						SOLUTIONS SATURÉES DE SULFATE DE CHAUX					
		après	Traces de décom-position 0	Très légère-ment décom-posé 1	Légère-ment décom-posé 2	Assez décom-posé 3	Forte-ment décom-posé 4	Disparu 5	Traces de décom-position 0	Très légère-ment décom-posé 1	Légère-ment décom-posé 2	Assez décom-posé 3	Forte-ment décom-posé 4	Disparu 5
Chaux siliceuse surcuite..........	1 : 4	1 mois	27 mois	28 mois	décomposition stationnaire				4 mois	6 mois	15 mois	23 mois	36 mois	50 mois
Chaux siliceuse cuisson ordinaire.	1 : 4	1 —	26 —	28 —	—				12 —	13 —	23 —	38 —	48 —	58 —
Ciment siliceux surcuit (*fig.* 16).....	1 : 4	1 —	30 —	32 —	—				6 —	7 —	23 —	36 —	42 —	60 —
Autre ciment siliceux surcuit (*fig.* 17).........................	1 : 4	1 —	31 —	32 —	—				10 —	12 —	36 —	42 —	68 —	**71** —
Ciment siliceux à hautes résistances.........................	1 : 4	1 —	16 —	17 —	—				6 —	7 —	23 —	36 —	48 —	**71** —

Les chiffres en gras indiquent que la décomposition signalée correspond au maximum de séjour depuis le temps d'immersion.

Par contre les ciments Portland, dont la teneur en Al^2O^3 approche des 10 0/0 admis par les cahiers des charges, se décomposent avec autant de rapidité dans le sulfate de magnésie que dans le sulfate de chaux et parfois même beaucoup plus rapidement (tableau XIII, *fig.* 18, p. 47).

Tableau XIII.

DÉSIGNATION DES PRODUITS MIS EN ESSAI	DOSAGE	IMMERSION après	IMMERSION DANS LA SOLUTION À 12 0/00 DE SULFATE DE MAGNÉSIE ANHYDRE					
			Traces de décomposition 0	Très légèrement décomposé 1	Légèrement décomposé 2	Assez décomposé 3	Fortement décomposé 4	Disparu 5
Ciment artificiel du commerce à 8 0/0 d'alumine	1 : 4	1 mois	12 mois	14 mois	58 mois	60 mois	63 mois	66 mois
Autre ciment artificiel du commerce à 8 0/0 d'alumine	1 : 4	24 heures	8 jours	12 jours		éprouvette détruite		
Autre — — —	1 : 4	1 mois	4 —	10 —	16 jours	15 jours	éprouvette détruite	
Autre — — —	1 : 5	24 heures	4 —	8 —	12 —	éprouvette détruite		
Autre — — —	1 : 5	1 mois	4 —	8 —	12 —	18 jours	25 jours	épr. détr.
Autre — — —	1 : 4	48 heures	5 mois	6 mois	7 mois	8 mois	8 mois 1/2	9 mois
Autre — — —	1 : 4	15 jours	15 jours	18 jours	40 jours	70 jours	7 mois	9 m
Autre — — —	1 : 4	1 mois	5 mois	6 mois	7 mois	8 mois	8 mois 1/2	9 —
Autre — — —	1 : 4	1 —	3 —	4 —	43 —	décomposition stationnaire		
Autre — — —	1 : 4	24 heures	3 —	4 —	8 —	15 mois	18 mois	22 mois
Autre — — —	1 : 4	1 mois	4 jours	8 jours	15 jours	30 jours	éprouvette détruite	
Autre — — —	1 : 5	24 heures	3 mois	4 mois	6 mois	10 mois	16 mois	22 mois
Autre — — —	1 : 5	1 mois	4 jours	8 jours	15 jours	22 jours	éprouvette détruite	
Autre — — —	1 : 4	24 heures	10 —	13 —		éprouvette détruite		
Autre — — —	1 : 4	1 mois	8 —	14 —	20 jours	26 jours	éprouvette détruite	
Autre — — —	1 : 5	24 heures	3 mois	4 mois	8 mois	13 mois	16 mois	22 mois
Autre — — —	1 : 5	1 mois	8 jours	14 jours	20 jours	26 jours	éprouvette détruite	
Ciment artificiel fabriqué spécialt pour résister aux décompositions (*fig.* 18)	1 : 4	48 heures	20 —	30 —	40 —	3 mois	16 mois	»

L'addition de stéarate de chaux et l'augmentation de l'indice donnent de meilleurs résultats (tableaux XIV, *fig*. 19 et 20) qu'avec la solution au sulfate de chaux

TABLEAU XIV.

DÉSIGNATION DES PRODUITS MIS EN ESSAI	DOSAGE	IMMERSION après	IMMERSION DANS LA SOLUTION A 12 0/00 DE SULFATE DE MAGNÉSIE ANHYDRE					
			Traces de décom-position 0	Très légère-ment décom-posé 1	Légère-ment décom-posé 2	Assez décom-posé 3	Forte-ment décom-posé 4	Disparu 5
Chaux siliceuse cuisson ordinaire sans addition........................	1 : 4	1 mois	26 mois	28 mois	décomposition stationnaire			
Chaux siliceuse cuisson ordinaire additionnée de 5 0/0 de stéarate de chaux (*fig*. 19, p. 53)......................................	1 : 5	24 heures	intact		»	»	»	»
Ciment siliceux cuisson ordinaire sans addition........................	1 : 4	1 mois	31 mois	32 mois	décomposition stationnaire			
Ciment siliceux cuisson ordinaire additionné de 5 0/0 de stéarate de chaux (*fig*. 20, p. 53)......................................	1 : 5	24 heures	intact		»	»	»	»
Ciment siliceux à haute teneur en silice, mouture intermédiaire.........	1 : 4	1 mois	30 mois	32 mois	décomposition stationnaire			
Ciment siliceux à haute teneur en silice, fine mouture..................	1 : 4	1 —	30 —	32 —	décomposition stationnaire			
Ciment à grand excès de silice et d'alumine cuit à basse température (indice 2,6)...	1 : 5	48 heures	intact		»	»	»	»
Ciment à grand excès de silice et d'alumine cuit à basse température avec addition de 10 0/0 de sulfate de chaux (indice 2,6)..................	1 : 5	48 —	intact		»	»	»	»

et l'addition de pouzzolane artificielle, surtout d'argile déshydratée, donne presque toujours des résultats favorables quoique insuffisants (tableau XV, *fig.* 21 et 22).

TABLEAU XV.

DÉSIGNATION DES PRODUITS MIS EN ESSAI	DOSAGE	IMMERSION après	IMMERSION DANS LA SOLUTION A 12 0/00 DE SULFATE DE MAGNÉSIE ANHYDRE					
			Traces de décomposition 0	Très légèrement décomposé 1	Légèrement décomposé 2	Assez décomposé 3	Fortement décomposé 4	Disparu 5
Ciment siliceux surcuit sans addition	1 : 4	1 mois	31 mois	32 mois	décomposition stationnaire			
1 partie ciment siliceux, 2 parties argile déshydratée	1 : 4	1 —			intact après 6 ans			
1 — — , 1 — —	1 : 4	24 heures			— 3 —			
1 — — , 1 — —	1 : 4	1 mois			— 3 —			
1 — — , 2 parties laitier artificiel	1 : 4	1 —	10 mois	12 mois	12 mois	50 mois	**76** mois	»
Autre ciment siliceux surcuit sans addition	1 : 4	48 heures	»	»	»	**31** —	»	»
1 partie ciment siliceux, 2 parties argile déshydratée (*fig.* 22, p. 53)	1 : 4	48 —	12 jours	13 jours	décomposition stationnaire			
1 — — , 2 — —	1 : 4	1 mois			intact après 3 ans			
Autre ciment siliceux surcuit sans addition (*fig.* 21, p. 53)	1 : 4	1 —	»	»	**31** mois	»	»	»
1 partie ciment siliceux, 1 partie argile déshydratée	1 : 4	48 heures	10 jours	12 jours	6 —	10 mois	15 mois	18 mois
Ciment siliceux cuisson ordinaire sans addition	1 : 4	1 mois	31 mois	32 mois	décomposition stationnaire			
1 partie ciment siliceux cuisson ordinaire, 2 parties argile déshydratée	1 : 4	1 —			intact après 6 ans			
1 — — laitier artificiel	1 : 4	1 —	10 mois	12 mois	34 mois	50 mois	décomposition stationnaire	
Ciment siliceux à haute résistance sans addition	1 : 4	1 —	16	17 —	décomposition stationnaire			
1 partie même ciment, 2 parties argile déshydratée	1 : 4	1 —	10 jours	1 —	3 mois	**71** mois	»	»
1 — — 2 — laitier artificiel	1 : 4	1 —	10 mois	12 —	48 —	**71** —	»	»
Ciment artificiel du commerce à 8 0/0 d'alumine sans addition	1 : 4	1	12 —	14 —	58 —	60 —	63 mois	66 mois
1 partie même ciment, 2 parties argile déshydratée	1 : 4	1 —			intact après 6 ans			
1 — 2 — laitier artificiel	1 : 4	1	10 mois	12 mois	42 mois	62 mois	décomposition stationnaire	
Autre ciment artificiel à 8 0/0 d'alumine sans addition	1 : 4	24 heures	8 jours	12 jours	éprouvette détruite			
1 partie même ciment, 2 parties argile déshydratée	1 : 4	24 —			intact après 5 ans			
Autre ciment artificiel à 8 0/0 d'alumine sans addition	1 : 4	1 mois	3 mois	4 mois	48 mois	décomposition stationnaire		
1 partie même ciment, 2 parties argile déshydratée	1 : 4	1 —			intact après 6 ans			
1 — 2 — laitier artificiel	1 : 4	1 —	1 mois	12 mois	36 mois	décomposition stationnaire		
Autre ciment artificiel à 8 0/0 d'alumine sans addition	1 : 4	24 heures	3 —	4 —	8 —	15 mois	18 mois	22 mois
1 partie même ciment, 2 parties argile déshydratée	1 : 4	1 mois	8 —	10 —	10 mois	15 —	27 —	déc. stat.
Autre ciment artificiel à 8 0/0 d'alumine sans addition	1 : 4	24 heures	10 jours	13 jours	éprouvette détruite			
1 partie même ciment, 2 parties argile déshydratée	1 : 4	24 —			intact après 5 ans			
Chaux siliceuse cuisson ordinaire	1 : 4	1 mois	26 mois	28 mois	décomposition stationnaire			
1 partie même chaux, 2 parties argile déshydratée	1 : 4	1 —	15 jours	1 —	»	**71** mois	»	»
Mélanges { 1 partie ciment siliceux surcuit / 1 — 1/2 lent à indice / Argile déshydratée }	1 : 4	24 heures	2 mois	3 -	14 mois	décomposition stationnaire		
Même mélange	1 : 4	1 mois			intact après 3 ans			

Les chiffres en gras indiquent que l'essai a été arrêté à cette époque.



Fig. 19 (tableau XIV).

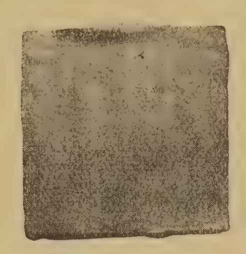


Fig. 20 (tableau XIV).

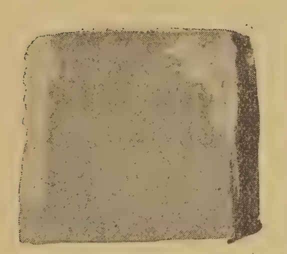


Fig. 21 (tableau XV).

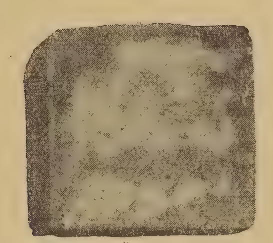


Fig. 22 (tableau XV).

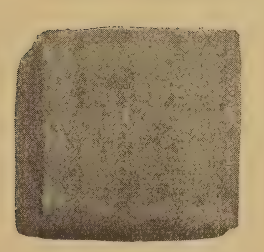


Fig. 23 (tableau XVIII).

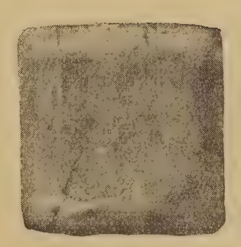


Fig. 24 (tableau XVIII).

La quantité d'eau de gâchage n'a pas plus d'influence qu'avec la solution au sulfate de chaux (tableau XV),

TABLEAU XV *bis*.

DÉSIGNATION DES PRODUITS MIS EN ESSAI	DOSAGE	IMMERSION après	IMMERSION DANS LA SOLUTION A 12 0/00 DE SULFATE DE MAGNÉSIE ANHYDRE					
			Traces de décomposition 0	Très légèrement décomposé 1	Légèrement décomposé 2	Assez décomposé 3	Fortement décomposé 4	Disparu 5
1 partie ciment siliceux haute résistance, 1 partie argile déshydratée, gâchée avec 35 0/0 d'eau	1 : 4	48 heures			**15** mois			
1 partie ciment siliceux haute résistance, 1 partie argile déshydratée, gâchée avec 30 0/0 d'eau	1 : 4	48 —			**15** mois			
1 partie ciment siliceux haute résistance, 1 partie argile déshydratée, gâchée avec 14 0/0 d'eau	1 : 4	48 —			**15** mois			
			Les chiffres en gras indiquent que les essais ont été arrêtés au bout de cette période.					

et en ce qui concerne la date d'immersion, l'immersion rapide est toujours défavorable surtout lorsqu'il y a addition de pouzzolane (tableau XVI).

TABLEAU XVI.

DÉSIGNATION DES PRODUITS MIS EN ESSAI	DOSAGE	IMMERSION après	IMMERSION DANS LA SOLUTION A 12 0/00 DE SULFATE DE MAGNÉSIE ANHYDRE					
			Traces de décom-position 0	Très légère-ment décom-posé 1	Légère-ment décom-posé 2	Assez décom-posé 3	Forte-ment décom-posé 4	Disparu 5
1 partie ciment siliceux surcuit 2 p. argile déshyd......	1 : 4	24 heures	2 jours	4 jours	8 jours	16 jours	éprouv. détruite	
1 — 2 —	1 : 5	24 —	2 —	4 —	8 —	16 —	éprouv. détruite	
1 — 2 —	1 : 4	48 —	12 —	13 —	décomposition stationnaire			
1 p. ciment artificiel du commerce 8 0/0 Al^2O^3 2 —	1 : 4	48 —	2 —	4 —	16 jours	décomposition stationnaire		
1 — 2 —	1 : 4	48 —	1 —	2 —	4 —	11 jours	9 mois	24 mois
1 — 2 —	1 : 4	24 —	4 —	8 —	éprouvette détruite			
1 — 2 —	1 : 5	24 —	4 —	8 —	éprouvette détruite			
1 partie ciment siliceux surcuit 2 —	1 : 4	15 jours	20 mois	21 mois	**32** mois	»	»	»
1 — 2 —	1 : 4	1 mois	intact					
1 — 2 —	1 : 5	1 —	intact					
1 — 2 —	1 : 4	1 —	intact					
1 — 2 —	1 : 4	1 —	»	**32** mois	»	»	»	»
1 p. ciment artificiel du commerce 8 0/0 Al^2O^3 2 —	1 : 4	1 —	intact					
1 — 2 —	1 : 4	1 —	11 mois	12 mois	décomposition stationnaire			
1 — 2 —	1 : 4	1 —	8 —	10 —	15 mois	27 mois	décomp. station.	
1 — 2 —	1 : 5	1 —	14 —	15 —	décomposition stationnaire			

Les chiffres en gras indiquent que les essais ont été arrêtés au bout de cette période.

III. **Action de l'eau de mer.** — Nos expériences sur l'action de l'eau de mer artificielle confirment la supériorité des ciments siliceux sur les ciments (tableau XVII, *fig*. 23 et 24, p. 53) à 8 0/0 d'alumine;

TABLEAU XVII.

DÉSIGNATION DES PRODUITS MIS EN ESSAI	DOSAGE	IMMERSION après	IMMERSION DANS L'EAU DE MER ARTIFICIELLE					
			Traces de décom-position 0	Très légère-ment décom-posé 1	Légère-ment décom-posé 2	Assez décom-posé 3	Forte-ment décom-posé 4	Disparu 5
Ciment siliceux surcuit (*fig*. 23, p. 53)	1 : 4	48 heures	intact					
Ciment artificiel du commerce à 8 0/0 d'alumine	1 : 4	48 heures	25 mois	28 mois	décomposition stationnaire			
— —	1 : 4	1 mois	18 —	20 —	27 mois	décomposition stationnaire		
Ciment artificiel du commerce 8 0/0 d'alumine fabr. spéc. pour résister aux décomp. (*fig*. 24, p. 53)	1 : 4	48 heures	30 jours	40 jours	4 —	**20** mois	»	»
— — —	1 : 4	1 mois	45 —	2 mois	3 —	15 —	**19** mois	»
— — —	1 : 5	48 heures	30 —	40 jours	4 —	»	**20** —	»
— — —	1 : 5	1 mois	45 —	2 mois	3 —	15 —	**19** —	»
Ciment prompt du commerce à fort indice	1 : 4	48 heures	2 mois	3 —	décomposition stationnaire			
— —	1 : 4	1 mois	12 —	15 —	19 mois	décomposition stationnaire		

Les chiffres en gras indiquent que les essais ont été arrêtés au bout de cette période.

et l'action favorable de l'addition d'argile déshydratée (tableau XVIII).

TABLEAU XVIII.

DÉSIGNATION DES PRODUITS MIS EN ESSAI	DOSAGE	IMMERSION après	IMMERSION DANS L'EAU DE MER ARTIFICIELLE					
			Traces de décom-position 0	Très légère-ment décom-posé 1	Légère-ment décom-posé 2	Assez décom-posé 3	Forte-ment décom-posé 4	Disparu 5
Ciment siliceux surcuit	1 : 4	48 heures	intact					
1 partie ciment siliceux, 2 parties argile déshydratée	1 : 4	48 heures	intact					
1 — — , 2 —	1 : 4	15 jours	intact					
1 — — , 2 —	1 : 4	48 heures	intact					
1 — — , 2 —	1 : 4	15 jours	intact					
Ciment artificiel du commerce à 8 0/0 d'alumine sans addition	1 : 4	48 heures	25 mois	28 mois	décomposition stationnaire			
1 partie ciment artificiel, 2 parties argile déshydratée	1 : 4	48 heures	intact					
1 — — , 2 —	1 : 4	15 jours	intact					
1 — — , 1 —	1 : 4	48 heures	intact					
1 — — , 1 —	1 : 4	15 jours	intact					
1 — — , 1 —	1 : 4	1 mois	7 mois	8 mois	9 mois	13 mois	**32** mois	»
Autre ciment artificiel du commerce à 8 0/0 d'alumine sans addition	1 : 4	1 mois	7 —	8 —	27 mois	**31** mois	»	»
1 partie ciment artificiel, 1 partie argile déshydratée	1 : 4	1 mois	intact					

Les chiffres en gras indiquent que les essais ont été arrêtés au bout de cette période.

Contrairement à ce qu'on a trouvé pour la solution au sulfate de magnésie, les immersions après un mois paraissent augmenter les attaques (tableau XIX).

TABLEAU XIX.

DÉSIGNATION DES PRODUITS MIS EN ESSAI	DOSAGE	IMMERSION après	IMMERSION DANS L'EAU DE MER ARTIFICIELLE					
			Traces de décomposition 0	Très légèrement décomposé 1	Légèrement décomposé 2	Assez décomposé 3	Fortement décomposé 4	Disparu 5
Ciment siliceux surcuit	1 : 4	48 heures	intact					
Ciment artificiel du commerce à 8 0/0 d'alumine	1 : 4	48 —	intact					
1 partie ciment ci-dessus à 8 0/0 d'alumine, 2 parties argile déshydratée	1 : 4	48 —	intact					
1 — — — , 1 partie —	1 : 4	48 —	intact					
Ciment siliceux surcuit	1 : 4	15 jours	intact					
Ciment artificiel du commerce à 8 0/0 d'alumine	1 : 4	1 mois	7 mois	8 mois	27 mois	**31** mois	»	»
1 partie ciment ci-dessus à 8 0/0 d'alumine, 2 parties argile déshydratée	1 : 4	1 —	18 —	20 —	28 —	décomposition stationnaire		
1 — — — , 1 partie —	1 : 4	1 —	7 —	8 —	9 —	13 mois	**31** mois	»

Les chiffres en gras indiquent que les essais ont été arrêtés au bout de cette période.

Ce phénomène est peut-être dû à la présence du chlorure de sodium qui achève le durcissement des mortiers immergés immédiatement.

CHAPITRE IV

RECHERCHES SUR LA PRISE ET LE DURCISSEMENT DES CIMENTS

CHAPITRE IV

RECHERCHES SUR LA PRISE ET LE DURCISSEMENT DES CIMENTS

---

§ 1. — GÉNÉRALITÉS. — DOSAGES DE LA CHAUX MISE EN LIBERTÉ PAR LES RÉACTIONS DES DURCISSEMENTS

Une certaine école attribue, dans le processus de la prise des ciments, une importance considérable à la formation de matières colloïdales.

S'il est possible que de pareilles substances se forment pendant la prise des ciments, il est néanmoins certain que le durcissement d'un produit peut être obtenu en dehors de leur formation et par cristallisation d'un sel dissous.

L'expérience suivante le prouve :

Si l'on mélange du sable très fin (calcaire broyé par exemple) avec 10 0/0 de son poids de chlorure de calcium fondu, que l'on gâche avec de l'eau et qu'on porte le mélange immédiatement à l'étuve, on obtient, au bout de quelques heures de dessiccation, un solide d'une très grande dureté. Bien entendu, remis dans l'eau, ou même simplement laissé à l'air libre, ce produit se ramollit (à cause de la déliquescence du chlorure de calcium).

La dureté, dans ce cas-là, était donc obtenue uniquement par la cristallisation du chlorure de calcium, par suite de l'évaporation de l'eau en excès.

En tout cas, la formation de cristaux d'hydrate de chaux durant le durcissement étant admise par tous les expérimentateurs, il était intéressant d'avoir une idée approximative sur la quantité de chaux qui cristallisait ainsi.

Pour cette recherche, l'appareil utilisé fut celui décrit au chapitre II.

On opérait de la façon suivante :

Le ciment durci était séché à l'étuve à 100°. On le triturait et on faisait d'une part la perte au feu à 500° C. et, d'autre part, le dosage de l'acide carbonique.

On portait à 500° C. quelques grammes de ce ciment de façon à décomposer non seulement les hydrates des silicates et aluminates (dissociés au-dessous de 150°), mais encore l'hydrate de chaux provenant de la chaux libre.

On passait le ciment ainsi traité dans l'extincteur rotatif, à 150° C. dans la vapeur d'eau pendant deux heures.

Dans ces conditions, ainsi que nous l'avons montré plus haut, seule la chaux vive se réhydratait, à l'exclusion des silicates ou aluminates. En faisant de nouveau la perte au feu à 500° C., on obtenait le poids d'eau fixé exclusivement par la chaux libre [1].

Les résultats obtenus avec trois ciments différents ont été les suivants :

	Chaux mise en liberté après		
	7 jours	1 mois	3 mois
	—	—	—
Ciment I............	3,84 0/0	3,877 0/0	2,54 0/0
Ciment II...........	1,40	2,20	1,57
Ciment III..........	non dosé	2,87	2,54

La teneur en acide carbonique augmente, bien que les pastilles aient été conservées dans de l'eau contenant un excès de chaux. Cela explique que la quantité d'hydrate de chaux mise en liberté aille en diminuant.

L'augmentation de l'acide carbonique fixé par la chaux est donné par le tableau ci-dessous :

	Acide carbonique fixé		
	Primitif	Après 7 jours	Après 1 mois
	—	—	—
Ciment I............	1,40 0/0	3,00 0/0	3,80 0/0
Ciment II...........	1,20	3,00	—
Ciment III..........	1,20	2,00	—

Avec le temps la carbonatation devient prépondérante et une briquette de ciment pur, après deux ans de durcissement sous l'eau potable, a donné les résultats suivants :

Chaux libre..............................	3,73 0/0
CO^2 fixé..............................	8,20 0/0

[1] Il ne faut pas faire la perte au feu au moufle (1.000-1.100°), sans quoi l'on recombinerait une partie de la chaux avec la silice et l'alumine des silicates acides.

Dans ce cas, la carbonatation est plus importante et la chaux totale mise en liberté plus considérable, l'acide carbonique ayant lui-même fortement contribué à la décomposition des silicates.

Ces expériences prouvent :

1° Que la quantité de chaux mise en liberté uniquement par l'action de l'eau est très faible et croît vraisemblablement très peu avec le temps. Les cristaux de chaux doivent former autour des grains de silicate une couche protectrice.

2° Que l'action de l'acide carbonique dans le processus du durcissement est très importante, même sous l'eau, ce qui explique que des produits très différents comme durcissement initial aient au bout de quelques années des résistances très analogues.

§ 2. — ACTION DE DIVERS PRODUITS SUR LA PRISE ET LE DURCISSEMENT

A. — **Produits agissant à doses infinitésimales.**

Le nombre des produits qui, ajoutés en faible quantité aux ciments, ont une action marquée sur leur prise et leur durcissement, est très considérable.

Celle du sulfate de chaux est bien connue. Nous avons étudié celle du sulfate de soude, du sulfate de zinc, du sulfate de fer, du sulfate de cuivre et du sulfate d'alumine.

L'action de ces divers produits est assez variable avec les divers liants, ainsi que le montre le tableau ci-après (tableau XX).

Le sulfate de cuivre retarde toujours la prise, et avec certains liants, à la dose de 1 0/0 ; il retarde de plus de huit jours le commencement de durcissement, qui se continue ensuite de telle façon que l'on obtient, à 28 jours, des résistances presque normales.

Le sulfate de soude, comme la soude libre, active généralement la prise et le durcissement.

Le sulfate de zinc, dans la proportion de 0,2 à 1 0/0, augmente notablement les résistances initiales, tout en ralentissant le début de la prise.

Le sulfate de fer, qui a cependant fait l'objet d'un brevet, m'a paru sans action, si ce n'est sur les prises qu'il ralentit à la manière du sulfate de chaux.

Le sulfate d'alumine empêche absolument la prise.

TABLEAU XX.

DÉSIGNATION DES ÉCHANTILLONS	PRISE		RÉSISTANCES A L'ARRACHEMENT							
			MATIÈRE PURE				MORTIER 1/3 PLASTIQUE			
	Début	Fin	2 jours	7 jours	28 jours	84 jours	2 jours	7 jours	28 jours	48 jours
Ciment AK pur témoin	4h 45	13h 00	19kg,12	31kg,87	40kg,75	»	11kg,00	21kg,25	22kg,25	»
— additionné de 0,2 0/0 sulfate de cuivre	3 20	10 15	15 87	27 00	30 87	»	12 12	22 25	25 25	»
— — de 0,5 0/0 —	3 15	10 35	16 25	30 37	38 75	»	10 12	25 00	27 87	»
— — de 1 0/0 —	14 00	non finie à 7 jours	0 00	0 00	»	»	0 00	2 00	»	»
Ciment EX pur témoin	4 10	11 50	7 66	10 83	21 16	»	7 87	11 62	14 16	»
— additionné de 1 0/0 sulfate de cuivre	14 40	non finie à 7 jours	0 00	0 00	21 50	»	0 00	0 66	17 50	»
Ciment AK additionné de 1 0/0 sulfate de soude	3 15	8 50	24 62	34 00	36 87	»	16 50	22 87	30 37	»
— — de 0,2 0/0 sulfate de zinc	8 50	14 50	22 12	38 75	37 37	»	13 62	22 75	24 15	»
— — de 1 0/0 —	8 15	14 15	26 25	36 87	37 37	»	15 37	29 00	33 62	»
Ciment PL pur témoin	2 30	7 45	»	21 62	29 25	38kg,00	»	13 50	21 50	28kg,87
— additionné de 1 0/0 sulfate de fer	3 40	10 00	»	19 62	32 37	34 75	»	13 12	21 25	29 62
— — de 2 0/0 —	6 00	11 10	»	20 25	29 50	40 87	»	13 50	20 25	26 75
— — de 3 0/0 —	8 00	13 20	»	17 12	27 50	37 75	»	14 12	19 75	27 87
Ciment LM pur témoin	3 45	9 00	»	26 62	41 12	38 12	»	13 75	22 50	24 75
— additionné de 1 0/0 sulfate de fer	4 50	10 50	»	26 12	42 16	41 62	»	18 37	24 62	26 62
— — de 2 0/0 —	6 05	11 30	»	32 37	46 75	42 25	»	18 50	25 12	29 25
— — de 3 0/0 —	7 50	12 55	»	33 75	43 37	38 62	»	14 66	20 50	23 75
Ciment LV pur témoin	3 25	4 45	»	33 25	38 57	40 87	»	14 37	17 50	19 37
— additionné de 1 0/0 sulfate de fer	6 40	7 50	»	34 87	34 00	43 87	»	14 00	16 75	19 06
— — de 2 0/0 —	9 25	11 25	»	31 25	37 12	42 00	»	14 62	16 75	21 25
— — de 3 0/0 —	11 50	14 40	»	31 62	39 12	45 25	»	14 12	19 62	23 00

Ces actions d'infiniment petits ne s'observent pas seulement avec les liants hydrauliques. La prise rapide du plâtre est fortement ralentie par l'addition de 0,5 à 1 0/0 de borax ou de phosphate de soude.

	Prise — Début	Prise — Fin
Plâtre témoin	0^h 05	0^h 10
Plâtre 99,5 + phosphate de soude 0,5	1 25	2 00
Plâtre 99 0/0 + phosphate de soude 1 0/0	2 00	3 50

B. — **Produits agissant à doses élevées.**

Tout le monde connaît l'action du chlorure de calcium sur la prise.

Ce sel peut rendre d'autres services, entre autres celui d'empêcher la dessiccation trop rapide des mortiers dans les pays chauds.

Le nitrate de soude — sel très déliquescent — possède la même propriété, à un degré encore plus élevé, comme le montre l'expérience suivante. On a gâché du mortier d'un même ciment avec les solutions : à 5 0/0 $CaCl^2$, 5 0/0 $MgCl^2$, 5 0/0 AzO^3Na, et avec de l'eau pure (essai témoin).

On en a façonné des cubes que l'on a pesés frais, puis mis à l'étuve à 60°. Des pesées, à intervalles de temps égaux, effectuées jusqu'à ce que deux pesées successives aient donné le même résultat, ont permis de mesurer la rapidité de la dessiccation. Après cette dernière pesée, les cubes étaient écrasés (tableau XXI).

Tableau XXI.

	Gachage à l'eau pure	Gachage avec une solution à 5 0/0 — $CaCl^2$	$MgCl^2$	AzO-Na
	kilog.	kilog.	kilog.	kilog.
Poids des cubes imméd^t après gâchage	0,344	0,355	0,346	0,348
Poids des cubes après 30^m de dessic. à 60°	0,341	0,352	0,344	0,346
— — 1^h —	0,336	0,347	0,338	0,341
— — 1^h 30 —	0,331	0,343	0,335	0,339
— — 2^h 00 —	0,327	0,339	0,331	0,336
— — 2^h 30 —	0,324	0,337	0,328	0,335
— — 3^h 00 —	0,323	0,336	0,328	0,335
— — 4^h 00 —	0,321	0,335	0,326	0,334
— — 5^h 00 —	0,319	0,333	0,325	0,332
— — 6^h 00 —	0,319	0,332	0,324	0,331
— — 7^h 00 —	0,319	0,332	0,324	0,331
Perte de poids 0/0	7,250	6,490	6,350	4,900
Résistances à la compression par cm²	6,000	40,000	42,000	36,000

TABLEAU XXII.

DÉSIGNATION DU PRODUIT	PRISE		RÉSISTANCES A L'ARRACHEMENT									
			MATIÈRE PURE					MORTIER 1 3 PLASTIQUE				
	Début	Fin	1 jour	2 jours	7 jours	28 jours	84 jours	1 jour	2 jours	7 jours	28 jours	84 jours
	h	h	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Ciment W. J. pur témoin	0,03	0,22	12,37	16,00	21,50	16,16	»	5,50	16,50	12,00	10,83	»
Ciment W. J. additionné de 2 0/0 de terre d'infusoires	1,15	2,45	18,37	32,37	42,50	25,33	»	16,37	25,37	24,25	21,75	»
Ciment W. J. additionné de 3 0/0 de terre d'infusoires	3,50	5,10	16,62	25,00	33,00	29,75	»	12,62	19,75	21,50	10,00	»
Ciment EB pur témoin	4,20	12,10	»	»	12,37	19,00	23,75	»	»	11,37	14,25	21,50
Mélange de : 80 p. ciment EB, 20 p. terre d'infusoires	6,50	79,35	»	»	6,00	13,25	22,33	»	»	7,37	13,75	22,12
Mélange de : 65 p. ciment EB, 35 p. terre d'infusoires	47,20	6 jours	»	»	1,87	11,87	10,87	»	»	4,25	11,62	22,12
Mélange de : 50 p. ciment EB, 50 p. terre d'infusoires	57,05	non finie à 7 jours	»	»	0,90	2,50	8,16	»	»	1,25	8,62	16,75

Le nitrate de soude est le produit qui a le mieux empêché la dessiccation. Ce sont naturellement les mortiers les moins desséchés qui donnent les meilleures résistances.

La silice d'infusoires, en proportions plus importantes que les substances précédemment mentionnées, retarde considérablement la prise (tableau XXII).

Pratiquement les sables du Plateau Central, connus sous le nom de « gorre », qui proviennent de la décomposition des feldspaths et contiennent à l'analyse de la silice soluble, agissent de la même façon, et cette circonstance rend leur emploi pour la confection des mortiers des plus dangereux.

Il y a là toute une série d'études qu'il serait intéressant de conduire méthodiquement, car leurs résultats jetteraient sans doute quelque lueur sur la question si complexe du durcissement des mortiers hydrauliques et leur constitution intime.

§ 3. — ACTION DU GYPSE SUR LES LAITIERS

A cette question de l'influence des additions sur la prise et le durcissement des ciments, se rattache celle de l'action si curieuse du gypse sur les laitiers.

M. le Dr Hans Kuhl (Berlin-Charlottenburg) a étudié les additions, en quantité même considérable, de gypse aux laitiers. Il en a conclu que le gypse employé seul provoque aussi bien le durcissement des laitiers granulés que la chaux ou le ciment, que les résistances atteintes étaient supérieures à celles des ciments de laitier usuels, et que ces ciments à base de gypse devaient être particulièrement rebelles à l'action décomposante des eaux dangereuses, telles que les eaux sulfatées ou celles de la mer.

Il résulte des essais que j'ai faits à ce sujet que le laitier additionné de gypse *seul* est inerte et ne fait pas prise, mais qu'il suffit d'y ajouter une trace de chaux pour déclencher la réaction et obtenir, avec le gypse, des résistances supérieures à celles qu'aurait réalisées une simple addition de chaux ou de ciment.

L'erreur de M. le Dr Hans Kuhl provient sans doute de ce que les mélanges qu'il fait de gypse et de laitiers pouvaient contenir des traces de chaux libre, même à son insu ; que du reste, le laitier

Tableau XXIII. — **Influence de l'addition de gypse sur l'éventement du ciment de laitier.**

Désignation des échantillons	Prise		Résistances à l'arrachement					
			Matière pure			Mortier 1/3 plastique		
	Début	Fin	7 jours	28 jours	84 jours	7 jours	28 jours	84 jours
	h	h	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Ciment de laitier ordinaire pur, essayé de suite	0,40	2,40	38,12	41,62	38,62	25,00	29.00	33.87
— — — après 1 mois	3,30	8,00	42,12	37,50	43,00	23,50	27,50	30,25
— — — après 2 mois	7,40	14,40	32,00	37,87	41,00	19,00	26,00	31,75
— — — après 3 mois	6,10	16,40	26,00	31,25	32,12	16,50	22,87	25,75
Même ciment addit. de 5 0/0 de gypse, essayé de suite	1,55	11,30	30.00	33,12	43,00	18.12	24,62	31,12
— — — après 1 mois	1,40	9,10	30,87	40,00	44,50	20,75	30,50	34,25
— — — après 2 mois	2,30	9,00	33,87	37,87	43,75	20,62	23,00	31,62
— — — après 3 mois	4,15	11,15	31,25	36,25	36.00	24.62	34,87	25,83

étant légèrement attaquable par l'eau, sa conservation à l'air libre peut, par l'action lente de l'humidité hygroscopique, mettre en liberté à la longue les traces de chaux libre suffisantes pour déclencher la réaction avec le gypse.

D'autre part, on sait que certains laitiers donnent des résistances très élevées par l'addition de doses très faibles de chaux ou de ciment. De pareils ciments de laitier sont d'ailleurs très éventables et cela se comprend facilement, car la chaux grasse ajoutée étant répartie dans une grande masse de matière, présente à l'action de l'acide carbonique de l'air une grande surface de contact et sa neutralisation est rapide.

Une fois carbonaté, le mélange n'est plus qu'un mélange laitier-carbonate de chaux. Or, l'addition de gypse à de pareils mélanges améliore considérablement leur conservation en les mettant à l'abri d'un éventement trop rapide (tableau XXIII).

En triturant au mortier de laboratoire du laitier et du gypse, on n'a jamais qu'un produit inerte. En faisant cette trituration à un petit broyeur, même bien nettoyé, on obtient quelquefois un produit à prise excessivement lente qui finit cependant par durcir. Ce durcissement paraît dû aux traces de chaux ou de ciment restées dans le broyeur, toujours moins propre qu'un mortier.

Par contre, l'introduction de 1 0/0 de chaux libre provoque une prise normale et un durcissement rapide (tableau XXIV).

TABLEAU XXIV.

DÉSIGNATION DES ÉCHANTILLONS	PRISE		RÉSISTANCES A L'ARRACHEMENT					
			MATIÈRE PURE			MORTIER 1/3 PLASTIQUE		
	Début	Fin	7 jours	28 jours	84 jours	7 jours	28 jours	84 jours
	h	h	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Mélange : 75 0/0 laitier, 25 0/0 gypse cristallin	20 55	non finie	4,12	19,00	35,00	1,87	31,00	32,50
Mélange : 82 0/0 laitier, 18 0/0 gypse cristallin	9 45	non finie	8,75	20,00	43,25	effondrés	0,00	0,00
Mélange : 80 0/0 laitier, 19 0/0 gypse, 1 0/0 chaux grasse éteinte	5 00	13 00	36,50	47,00	39,00	34,50	41,00	37,75

Au point de vue de la résistance de ces ciments de laitier additionné de fortes proportions de gypse à la décomposition par les eaux dangereuses, les expériences de laboratoire donnent des résultats très favorables. Tandis que, conservée dans l'eau saturée de sulfate de chaux, une éprouvette en mortier maigre de ciment de laitier ordinaire commence dès quatorze mois à se gercer légèrement pour disparaître complètement au bout de cinquante-cinq mois, et que conservée dans une solution à 2 0/0 de sulfate de magnésie, elle se gerce dès trois mois pour disparaître en trente-cinq mois, les mélanges suivants :

Laitier	Gypse	Chaux
—	—	—
93	6	1
90	9	1
86	13	1
80	19	1

n'ont subi aucune altération au bout de trente-neuf mois, dans les mêmes solutions et dans l'eau de mer.

Peut-être ces nouveaux produits mériteraient-ils un essai en petit de fabrication industrielle et d'emploi.

Il serait peut-être aussi intéressant, en choisissant des laitiers incolores, de tenter par ce moyen la fabrication d'un *plâtre hydraulique blanc* composé de laitier, gypse et un peu de chaux grasse qui pourrait avoir quelques applications.

CHAPITRE V

RECHERCHES SUR CERTAINES PROPRIÉTÉS DES CIMENTS OU MORTIERS MIS EN ŒUVRE

CHAPITRE V

RECHERCHES SUR CERTAINES PROPRIÉTÉS DES CIMENTS OU MORTIERS MIS EN ŒUVRE

---

§ 1. — IMPERMÉABILISATION DES MORTIERS

Pour obtenir l'imperméabilisation des mortiers, M. H. Le Chatelier avait essayé le carbonate de baryte.

Par double décomposition avec le sulfate de chaux ou le sulfate de magnésie, celui-ci devait donner du carbonate de chaux ou de magnésie et du sulfate de baryte. Ces composés insolubles se précipitant dans les pores du mortier devaient les obstruer et les rendre imperméables à l'eau. Les résultats ont été négatifs.

Dans le même ordre d'idées, nous avons essayé un mélange d'aluminate de baryte et de sulfate de chaux ainsi que diverses substances déjà utilisées ailleurs ou vendues dans le commerce, et nous ne croyons mieux faire que de transcrire ici la communication que nous fîmes au Congrès de New-York en 1912 et qui résumait les résultats obtenus.

Nous rappellerons que M. H. Le Chatelier avait montré qu'on doit considérer dans les mortiers deux sortes de perméabilités, l'une qu'on peut appeler la perméabilité normale, l'autre qu'on peut appeler la perméabilité à la diffusion.

Un enduit mis en contact d'eau sous pression peut ne se laisser traverser par aucune goutte d'eau et être par conséquent « normalement imperméable » et cependant « s'humidifier par capillarité ». Dans ce dernier cas la diffusion des sels du mortier à l'extérieur et des sels de l'eau extérieure à l'intérieur du mortier se fait facilement.

Depuis, les travaux de M. Maynard ont permis d'établir que c'est

la diffusion de la chaux de l'intérieur du mortier qui est le premier acte de la désagrégation des mortiers à l'eau de mer.

Il était donc important de rechercher des substances qui imperméabilisent les mortiers à la diffusion, c'est ce que nous avons essayé de faire.

Pour mesurer la perméabilité à la diffusion, M. H. Le Chatelier avait proposé d'immerger les éprouvettes, petits cubes ou petits cylindres, dans des solutions de bisulfure de calcium ou de monosulfure de sodium.

Après un temps plus ou moins long d'immersion, on retire l'éprouvette, on la casse et, après lavage de la surface cassée, on plonge les deux moitiés dans l'acétate de plomb.

Dans toutes les parties où le sulfure a diffusé, il se produit instantanément une coloration noire due au sulfure de plomb formé.

C'est cette méthode que nous avons employée avec mon collaborateur M. R. Amic.

Le bain était du monosulfure de sodium à 10 0/0.

Les éprouvettes, des cubes de 5 centimètres de côté.

La perméabilité est exprimée en 0/0 par le rapport centésimal de la couche pénétrée à la couche pénétrable.

Si par exemple, dans un cube de 50 millimètres d'arête, la couche pénétrée est de 10 millimètres, nous disons que la pénétration est de 10/25, soit 40 0/0.

Nous avons essayé de provoquer l'imperméabilité à la diffusion soit par la précipitation à l'intérieur même du mortier d'une matière pulvérulente et inerte, soit par le mélange aux mortiers de matières grasses ou de corps colloïdaux.

A. *Matières pulvérulentes.* — Comme matière pulvérulente à précipiter à l'intérieur même des mortiers, nous avons employé le sulfate de baryte.

On obtient cette précipitation en introduisant dans les mortiers de l'aluminate de baryte trituré et en soumettant les éprouvettes à l'action de solutions de sulfate de chaux ou de sulfate de magnésie ; ou en introduisant à la fois, dans le mortier lui-même, le sulfate de chaux et l'aluminate de baryte.

Une expérience préliminaire nous avait montré qu'un mélange constitué uniquement d'aluminate de baryte et de gypse (60 alumi-

nate, 40 gypse) durcissait, pouvait se conserver sous l'eau et était beaucoup plus imperméable que les essais témoins en ciment.

Les tableaux suivants donnent les résultats obtenus avec les deux modes opératoires décrits plus haut (tableau XXV à XXIX).

Tableau XXV.

	CONSERVATION avant immersion	PÉNÉTRATION après une durée de séjour dans la solution de monosulfure de sodium de :		
		3 jours	7 jours	10 jours
Ciment pur témoin.........	7 jours eau de chaux.	53 0/0	73 0/0	100 0/0
Mélange 60 alumin. de baryte et 40 gypse...............		7	13	20
Mortier 1/3 ciment (témoin).		60	83	100
Mortier 1/3 avec mélange de 60 aluminate de baryte et 40 gypse.................		20	30	30

Tableau XXVI.

	CONSERVATION avant immersion	PÉNÉTRATION après une durée de séjour dans la solution de monosulfure de sodium de :	
		3 jours	10 jours
Cylindres en ciment pâte pure (témoin).	7 jours eau de chaux.	30 0/0	57 0/0
Cylindres mortier (1/3 témoin)........		56	100
Cylindres pâte pure avec 2 0/0 en poids aluminate de baryte................	7 jours eau saturée de gypse.	30	45
Cylindres mortier 1/3 avec 2 0/0 en poids aluminate de baryte................		40	100
Cylindres pâte pure avec 5 0/0 en poids aluminate de baryte................		20	33
Cylindres mortier 1/3 avec 5 0/0 en poids aluminate de baryte		30	64

Tableau XXVII.

	Conservation avant immersion	Pénétration après une durée de séjour dans la solution de monosulfure de sodium de : 3 jours	7 jours
Ciment pâte pure (témoin)	7 jours solution de gypse saturée	47 0/0	63 0/0
Ciment pâte pure avec 10 0/0 en poids aluminate de baryte		26	40
Ciment mortier 1/3 (témoin)		60	100
Ciment mortier 1/3 avec 10 0/0 en poids aluminate de baryte		36	47

Tableau XXVIII.

	Conservation avant immersion	Pénétration après une durée de séjour dans la solution de monosulfure de sodium de : 3 jours	7 jours
Ciment pâte pure (témoin)	7 jours dans le sulfate à 2 0/0.	43 0/0	53 0/0
Ciment avec 10 0/0 en poids aluminate de baryte		20	33
Ciment mortier 1/3 (témoin)		66	66
Ciment avec 10 0/0 en poids aluminate de baryte		43	53

Tableau XXIX.

	Conservation avant immersion	Pénétration après une durée de séjour dans la solution de monosulfure de sodium de : 3 jours	7 jours	10 jours
Ciment pâte pure (témoin)	7 jours dans l'eau de chaux.	46 0/0	66 0/0	100 0/0
Ciment avec 10 0/0 aluminate de baryte et 7 0/0 de sulfate chaux en poids		30	30	43
Ciment mortier 1/3 (témoin)		50	100	100
Ciment avec 10 0/0 aluminate de baryte et 7 0/0 sulfate de chaux en poids		46	60	60

La durée de séjour dans les solutions de sulfate de chaux ou de magnésie n'étant que de sept jours, l'imperméabilité a été incomplète. Il y avait lieu de supposer qu'elle serait plus complète pour une durée plus longue et aussi qu'elle serait plus forte du côté de la surface en contact avec la solution qu'au milieu des cubes.

Pour faire cette vérification nous avons confectionné des éprouvettes cubiques en ciment additionné de 10 0/0 en poids d'aluminate de baryte et en mortier de ce ciment. Nous les avons plongées dans une solution à 2 0/0 de sulfate de magnésie où nous les avons laissées respectivement 7 jours, 14 jours et 37 jours.

Après chacune de ces périodes, les éprouvettes ont été retirées, cassées par le milieu et on les a plongées dans la solution de sulfure, où elles sont restées 7 jours, puis traitées par l'acétate de plomb.

De cette façon on a pu constater la pénétration du sulfure tant par la face fraîche que par les faces extérieures (tableau XXX).

Tableau XXX.

	Pénétration après 7 jours dans le sulfure de sodium et une durée du séjour dans le sulfate de magnésie de :					
	Par faces extérieures :			Par faces fraîches :		
	7 jours	14 jours	37 jours	7 jours	14 jours	37 jours
Ciment pâte pure (témoin)......	16 0/0	16 0/0	12 0/0	24 0/0	20 0/0	10 0/0
Ciment avec 10 0/0 en poids aluminate de baryte..............	4	6	3	8	10	4
Ciment mortier 1/3 (témoin)....	28	26	12	40	30	24
Ciment avec 10 0/0 en poids du ciment aluminate de baryte ...	8	10	3	16	14	10
Béton (témoin).................	32	34	8	44	46	24
Béton avec 10 0/0 en poids du ciment aluminate de baryte...	8	14	4	28	18	16

Tels qu'ils sont, ces résultats sont intéressants, car en pratique un mortier ainsi constitué et immergé à l'eau de mer devrait se colmater complètement après quelques mois.

B. *Matières grasses colloïdales.* — Comme matières grasses et colloïdales, nous avons essayé :

a) Les divers produits vendus dans le commerce et qui ont la réputation de provoquer l'imperméabilité normale, puis la caséine et diverses gélatines ;

b) Le gâchage à l'eau savonneuse, qui a la même réputation ;

c) L'addition d'huile minérale qui a été préconisée ces derniers temps en Amérique.

1° Les résultats ont été nuls avec le « Fugydros », négatifs avec la « Cérésite », l' « Aquabar » et les gélatines, les éprouvettes de ces trois derniers produits ayant donné des pénérations plus profondes que les éprouvettes témoins.

Les résultats ont été également négatifs avec une gelée d'algues du nom de « Norgine » et employée dans l'apprêt des tissus.

Négatifs également avec la caséine, la gomme de cerisier, la gomme adragante, les cires végétales. La farine de lin ou le mucilage de graines de lin ont rendu impossible le gâchage du ciment.

Ils ont par contre été intéressants avec le « Fucose », autre gelée d'algues qui, contrairement à la « Norgine », ne se coagule pas en présence des bases (tableau XXXI).

Tableau XXXI.

	CONSERVATION	DURÉE DE SÉJOUR dans le monosulfure de sodium
	7 jours	7 jours
Ciment pâte pure (témoin)	»	16 0/0
Ciment mortier 1/3 (témoin)	»	28 —
Ciment pâte pure additionné de 3 0/0 de fucose	»	12 —
Ciment mortier 1/3 additionné de 3 0/0 de fucose	à l'eau de chaux	20 —
Ciment pâte pure 1/3 additionné de 5 0/0 de fucose	»	0 —
Ciment mortier 1/3 additionné de 5 0/0 de fucose	»	20 —
Ciment pâte pure additionné de 10 0/0 de fucose	»	0 —
Ciment mortier 1/3 additionné de 10 0/0 de fucose	»	12 —

2° Le « fucose » ayant une influence assez nette sur la fissuration des mortiers qu'il diminue, nous avons tenté l'essai de l'eau de savon qui donne, à ce dernier point de vue, des résultats encore meilleurs.

Mais les éprouvettes gâchées avec des solutions de 5, 10, 15 et 20 0/0 de savon blanc de Marseille se sont montrées beaucoup plus perméables que les témoins.

Peut-être cela tient-il simplement à la formation, en présence de sulfures de sodium, de savons de soude qui se dissolvent et il y aurait peut-être lieu de chercher une autre méthode d'expérimentations applicable à ce produit.

Je n'ai pas essayé non plus le stéaropalmitate de chaux préconisé autrefois par M. Newburry et qui donnerait probablement des résultats.

3° Nous avons expérimenté deux huiles minérales russes du commerce, « l'Oléonaphte » et la « Valvoline » (huile épaisse pour cylindres).

L'introduction de l'huile minérale se fait très simplement après gâchage de la pâte pure et du mortier. L'émulsion est rapidement obtenue sauf avec de très fortes proportions de « valvoline ».

Nous donnons les résultats obtenus avec la valvoline qui sont les plus intéressants (tableau XXXII).

TABLEAU XXXII.

TEMPS D'IMMERSION		PRODUIT tel quel témoin		PRODUIT ADDITIONNÉ de 5 0/0 du poids du liant de valvoline		PRODUIT ADDITIONNÉ de 10 0/0 du poids du liant de valvoline	
à l'eau potable	au sulfure de calcium	mortier 1 : 3	mortier 1 : 5	mortier 1 : 3	mortier 1 : 5	mortier 1 : 3	mortier 1 : 5
			1° *Chaux A. D.*				
10 jours	7 jours	P. 500/0	P. C.	P. 330/0	P. 700/0	P. 250/0	P. 500/0
28 —	7 —	P. 350/0	P. 800/0	P. 150/0	P. 200/0	P. 100/0	P. 150/0
			2° *Chaux M.*				
10 jours	7 jours	P. 450/0	P. C.	P. 330/0	P. 700/0	P. 220/0	P. 500/0
28 —	7 —	P. 330/0	P. 500/0	P. 200/0	P. 300/0	P. 100/0	P. 150/0
			3° *Ciment L.*				
10 jours	7 jours	P. 400/0	P. 750/0	P. 250/0	P. 350/0	P. 200/0	P. 400/0
28 —	7 —	P. 380/0	P. 450/0	P. 150/0	P. 200/0	P. 100/0	P. 150/0
			4° *Ciment M.*				
7 jours	7 jours	P. 500/0	P. C.	P. 200/0	P. 350/0	P. 200/0	P. 320/0
28 —	6 —	P. 200/0	P. 350/0	P. 120/0	P. 200/0	P. 100/0	P. 180/0

N. B. — P. C. signifie : pénétré complètement.
P. 0/0 signifie : pénétré de....0/0.

Ils sont d'autant plus intéressants que la conservation à l'eau

potable a été plus prolongée. Ceci confirme les essais faits par M. Page en Amérique.

L'étude de l'influence sur les résistances des mortiers de tous les produits gras ou colloïdaux. étudiés a montré que la Cérésite, l'Aquabar, le Fugydros, la Caséine diminuent peu les résistances des mortiers, tandis que la Norgine, la gomme de cerisier, la gomme adragante, la cire végétale les diminuent considérablement. Le fucosol ralentit un peu le durcisssement, mais à 84 jours les résistances sont redevenues normales.

Il en est de même avec l'eau de savon et l'huile minérale, sauf peut-être qu'avec ces deux produits il faut attendre six mois pour retrouver l'égalité des résistances.

On peut donc obtenir une imperméabilité à la diffusion importante des mortiers soumis à l'action de l'eau de mer en additionnant ceux-ci, au moment du gâchage d'aluminate de baryte qui se transforme en sulfate de baryte, lequel en précipitant bouche les canaux capillaires.

On peut encore obtenir une certaine imperméabilité par l'addition de matières grasses ou gélatineuses.

Parmi ces produits, les huiles minérales épaisses et le fucosol semblent à recommander.

Mais si certaines additions sont efficaces pour protéger les mortiers contre la pénétration des liqueurs qui les baignent, cette efficacité est surtout limitée aux premiers temps du durcissement et dans tous les cas, toutes les additions ont pour effet de diminuer les résistances des mortiers.

La conclusion de mes recherches à ce sujet est donc la même que celle de M. Gary, dans son rapport sur l'imperméabilisation du ciment présenté au Congrès de New-York, et celle de M. Feret, dans son travail sur l'addition d'huile minérale (*Annales des Ponts et Chaussées*, septembre-octobre 1913, p. 413), à savoir que la méthode la plus sûre jusqu'ici pour obtenir des mortiers étanches est de leur donner la compacité maxima, par un choix judicieux du dosage et du sable.

Un dosage élevé en ciment augmente le prix de revient du béton, il est vrai, mais encore moins que l'addition de produits souvent chers, difficiles à se procurer et dont l'efficacité très relative au point de vue imperméabilisation est contre-balancée par la diminution notable des résistances du mortier.

§ 2. — RETRAIT

Parmi les propriétés des mortiers, une des plus importantes à étudier est le *retrait*.

Outre que les efforts que subissent de ce fait les ouvrages en ciment armé sont loin d'être négligeables, les fissures et fendillements que le retrait occasionne sur les enduits et carrelages sont des plus désagréables à l'œil.

Depuis les travaux de Durand Claye et Considère ce phénomène est bien connu, et les essais que j'ai faits en collaboration avec M. R. Amic ont porté sur l'étude d'un procédé rapide et commode pour comparer les retraits des divers liants entre eux, et d'un même liant dans divers milieux et avec différentes additions.

La méthode employée pour apprécier le retrait consiste à étendre une couche mince de ciment sur une lamelle de clinquant, et à fixer celle-ci, par une de ses extrémités, contre une plaque de verre. L'autre extrémité restée libre s'écarte de plus en plus de la plaque, au fur et à mesure du durcissement du ciment, et la distance de sa pointe à la plaque donne une mesure de la flexion due au retrait.

En opérant ainsi, on constate une flexion au fur et à mesure que le durcissement se produit, parce que la partie supérieure de la couche de ciment, non liée à la plaque par adhérence, peut seule se raccourcir.

Nous avons pu procéder ainsi commodément à certaines recherches telles que : retrait comparé de diverses sortes de liants hydrauliques ; influence du milieu d'exposition, air sec ou air humide ; influence du séjour préalable, plus ou moins prolongé, à l'air sec, à l'air humide et à l'acide carbonique ; influence de la finesse de mouture, du mélange de divers produits aux liants hydrauliques, etc.

On savait déjà que le retrait était plus considérable pour le ciment gâché pur que pour les mortiers, pour les mortiers gras que pour les mortiers maigres.

On avait proposé pour éviter le retrait de maintenir les enduits humides aussi longtemps que possible : nous verrons plus loin de curieux résultats à ce sujet.

Exposé de la méthode. — Après avoir essayé diverses formes de plaques, nous avons été amenés à adopter des lamelles de zinc en feuilles minces de $0^{cm},1$ à $0^{cm},2$ d'épaisseur ayant 20 millimètres

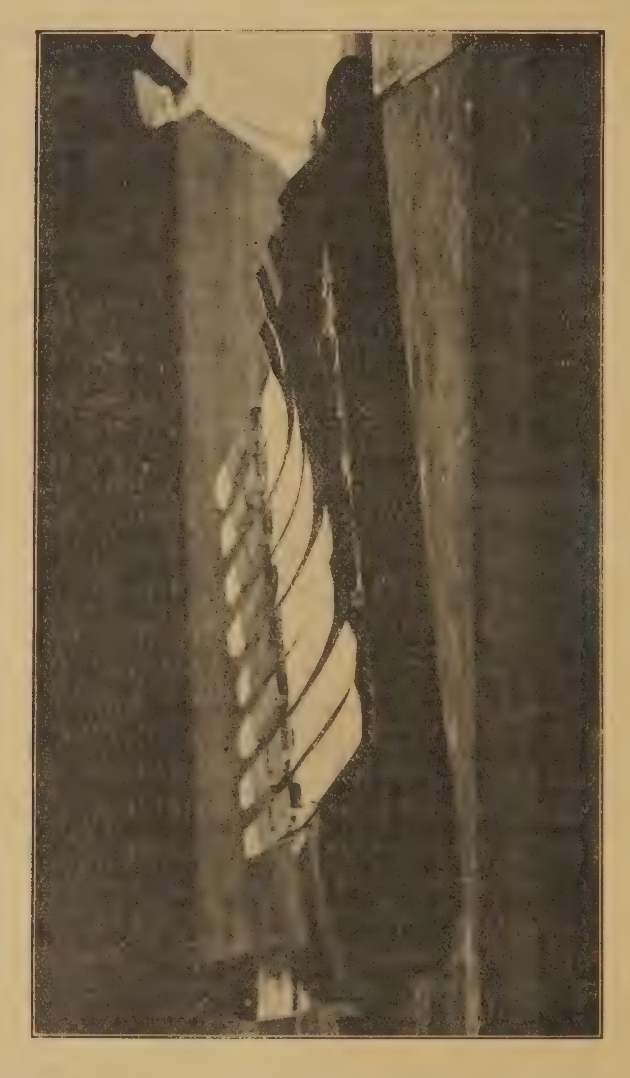


Fig. 25.

de large et 130 millimètres de long, elles doivent toujours être de mêmes dimensions, bien propres, lavées à l'alcool.

L'emploi de zinc est commode parce que le ciment y adhère bien. Malheureusement le zinc a un coefficient de dilatation double de celui du ciment, ce qui peut dans une certaine mesure, troubler les

résultats absolus. Pour des essais comparatifs cet inconvénient nous a paru négligeable.

Une des extrémités de la lamelle est taillée en pointe, l'autre est fixée à plat contre une plaque de verre et maintenue par une simple pince de blanchisseuse.

Lorsque le retrait a lieu, la partie du ciment en contact avec la lamelle ne pouvant se retirer par suite de son adhérence avec le métal, l'extrémité libre se recourbe vers le haut, et la mesure de cette flexion donne une appréciation du retrait du ciment (*fig.* 25).

Nous opérons cette mesure à l'aide d'un pied à coulisse, avec vernier au dixième de millimètre. Le tour de main consiste à donner à la couche de ciment une épaisseur toujours égale pour que les essais soient comparables entre eux. La plus facile à réaliser avec un peu d'adresse est celle de 1^{mm}, 5.

Nous avons presque toujours préparé deux lamelles avec le même ciment de façon à pouvoir contrôler l'une par l'autre les mesures obtenues et les rejeter quand elles étaient trop différentes.

Manière d'effectuer et d'interpréter les mesures. — Nous avons procédé à la mesure de la flexion des lamelles en général toutes les vingt-quatre heures, quelquefois plus souvent, rarement moins. En général, c'est surtout dans les premiers moments du durcissement qu'il faut espacer le moins possible les mesures. Cependant, au bout de quelques jours les variations de la flexion deviennent beaucoup plus faibles et elles tendent à s'annuler, sans qu'on puisse fixer une limite absolue de la flexion. Car nous avons constaté que, sur un ciment complètement durci et assez âgé, l'état hygrométrique de l'air faisait encore augmenter ou diminuer le retrait.

Étant donné ces variations indéfinies, nous avons adopté la technique suivante : La flexion maximum des deux lamelles composant un essai a été considérée comme exprimant le retrait maximum. Une fois cette flexion maximum obtenue on n'a plus que les oscillations dues à l'état hygrométrique de l'atmosphère. Comme chiffre représentant le retrait moyen, nous avons pris la moyenne des maxima de chacune des deux lamelles. On peut objecter que ces maxima peuvent se produire précisément dans l'intervalle de deux mesures successives. Nous avons cependant reconnu que, même dans les débuts du durcissement où la flexion peut varier

assez rapidement, un intervalle de six heures, entre deux mesures successives, paraît suffire pour éviter toute erreur.

Résultats. — Les résultats détaillés de nos essais sont indiqués en suivant l'ordre dans lequel ils ont été effectués, ce qui explique les modifications et améliorations que nous y avons apportés au fur et à mesure.

A. — Influence du milieu d'exposition.

1° Retrait des divers ciments ou chaux a l'air libre.

Les mesures de la flexion données ci-dessous sont exprimées en millimètres. Les ciments ont été gâchés en pâte pure avec 28,5 0/0 d'eau.

Voici les résultats obtenus :

	Maximum	Moyen	Date des maxima après gâchage
	—	—	—
Ciment A............	4,5	4,5	262 heures
Chaux B............	6,5	6	210 —
Ciment C............	8,6	8,4	234 —
— D............	9,9	9,8	264 —
— E............	9,3	9	312 —
— F............	12,6	»	» —
— prompt G....	12	10,6	240 —
— — retri-turé H............	11,9	11,3	240 —

Les différences de retrait sont donc considérables d'un ciment à l'autre et les ciments prompts sont parmi ceux qui ont le plus fort retrait.

Nous devons ajouter que, uniquement à l'air, les résultats sont peu comparables, parce qu'il y a de nombreuses fissurations. Aussi avons-nous bientôt renoncé à cette technique et immergé les lamelles dans l'eau aussitôt après les avoir recouvertes de ciment.

2° Retrait des mêmes ciments après séjour préalable de 72 heures sous l'eau puis retrait a l'air libre.

Voici les résultats obtenus :

	Maxima	Moyen	Date des maxima après sortie de l'eau
	—	—	—
Ciment A............	8	7,8	264 heures
Chaux B............	19,8	18,5	144 —
Ciment C............	33	»	144 —
— D............	21,5	»	72 —
— E............	16,1	13	120 —

Comme on le voit, cette immersion préalable dans l'eau a augmenté dans de très fortes proportions le retrait ultérieur du ciment à l'air libre.

Ce mode opératoire présente aussi de nombreuses difficultés pratiques : la couche de ciment se délave, s'écaille, se sépare de la plaque de métal, et lorsqu'on l'expose à l'air le retrait est si brusque que la plupart du temps le ciment casse. Aussi après cette seconde tentative avons-nous remplacé le séjour préalable dans l'eau par un séjour préalable à l'air humide qui, comme nous allons voir, nous a donné de meilleurs résultats.

3° Retrait des mêmes ciments après un séjour de six jours a l'air humide.

Nous avons mis les lamelles, aussitôt préparées, sous une cloche reposant sur du sable humide. Au bout de six jours elles ne présentaient aucun retrait. Nous les avons alors retirées de la cloche et exposées à l'air libre.

Nous avons obtenu les résultats suivants :

	Maximum	Moyen	Date des maxima après sortie de l'air humide
Ciment A (23 0/0 eau de gâchage).	7	6	166 heures
Chaux B (31 0/0 —).	11,8	11	168 —
Ciment C (28,50/0 —).	14,4	13,9	178 —
— D — — .	14,7	14,2	202 —
— E — — .	15,4	15,2	288 —
— F — — .	18,7	17,8	120 —
— G — — .	6,7	6,5	240 —
— H (retrituré)...............	11	10,6	240 —

Si nous comparons ces chiffres avec ceux que nous a fournis l'essai 1° sans séjour préalable dans l'air humide, nous constatons, comme pour l'immersion, que le retrait de chaque sorte de liant a été fortement augmenté, mais nous n'avons eu aucun des inconvénients de technique signalés antérieurement.

4° Retrait des mêmes ciments après un séjour prolongé (30 jours) dans l'air humide.

On sait qu'il est recommandé de recouvrir les enduits frais de sacs mouillés ou de sable humide et de les laisser ainsi le plus

longtemps possible. Il était donc intéressant d'étudier l'influence d'un séjour plus ou moins prolongé dons l'air humide.

Cette fois nous avons laissé les lamelles trente jours dans l'air saturé d'humidité avant de les exposer à l'air libre.

Voici les résultats obtenus :

	Maximum	Moyen	Date des maxima après sortie de l'air humide
Ciment D (28,5 0/0 eau de gâchage).	12,8	12	246 heures
— E — — .	15,5	14	102 —
— F — — .	15	14,9	270 —

Les retraits sont encore considérables quoique moindres qu'après six jours d'exposition à l'air humide. Si l'on veut que l'exposition à l'air humide produise pratiquement un effet appréciable, elle doit donc être prolongée très longtemps.

5° Influence de la proportion d'eau de gachage.

Nous avons opéré avec les deux sortes de ciments qui nous ont donné les plus forts retraits, le ciment E et le ciment F.

Voici les résultats obtenus :

	Maximum	Moyen	Date des maxima après sortie de l'air humide
Ciment E (28,5 0/0 eau de gâchage).	15,4	15,2	288 heures
— E (31,0 0/0 —).	15	14,7	288 —
— F (28,5 0/0 —).	18,7	17,8	120 —
— F (31,0 0/0 —).	20,0	19,5	120 —

En somme les différences ne sont pas bien grandes.

6° Action de l'acide carbonique.

Nous avons soumis les lamelles de ciment à l'action de l'acide carbonique gazeux, en présence de sable humide, dans une cloche renversée recouverte d'une plaque de verre la bouchant herméti-quement comme le montre la photographie ci-contre (*fig.* 26). Nous avons prolongé cette action six jours en renouvelant par deux fois le gaz acide carbonique. Au bout de ce temps, les lamelles ne présentaient aucun indice de flexion, elles étaient parfaitement planes.

Nous les avons alors exposées à l'air libre.

Voici les résultats obtenus :

	Maximum	Minimum	Date des maxima après sortie de l'air humide
	—	—	—
Ciment E (28,5 0/0 eau de gâchage)...	4,1	4,0	50 heures
— F — — ...	6,5	6,3	50 —
— A — — ...	2,0	1,7	24 —
— G — — ...	7,5	5,7	288 —
— H — — ...	3,8	3,4	» —

On voit combien le retrait a été atténué.

Nous avons de plus observé un phénomène curieux dans une autre expérience analogue : les ciments prompts G et H ont pris

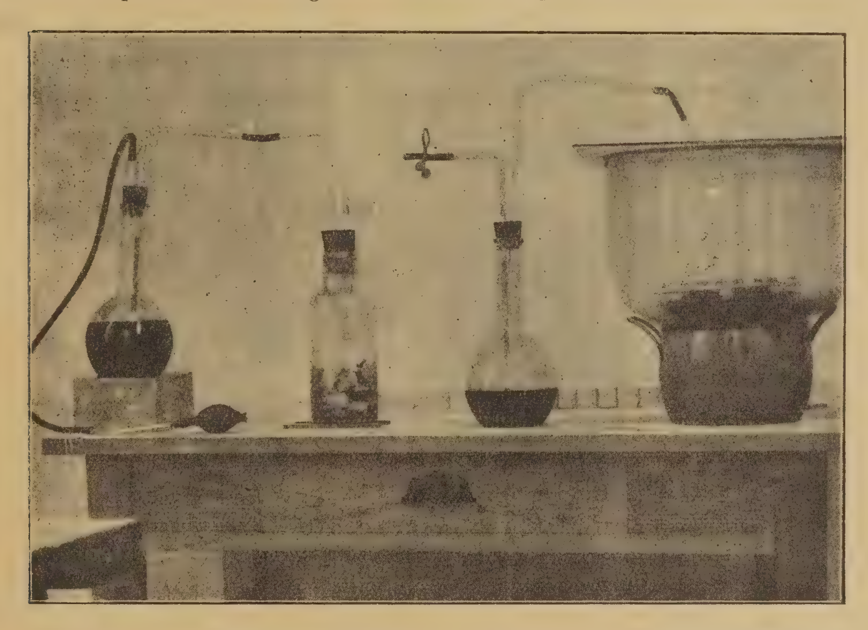


Fig. 26.

leur retrait *dans la cloche même*, puis à l'air libre ce retrait a diminué jusqu'à 0 et il est ensuite devenu négatif, c'est-à-dire que la lamelle s'est recourbée en sens inverse, les extrémités touchant l'appui et le milieu soulevé avec une flèche de $2^{mm},4$. Ils ont donc gonflé, peut-être par suite de présence de chaux libre.

B. — **Influence des mélanges.**

Nous avons fait deux séries d'essais : dans l'une, nous avons effectué les mélanges avec du ciment E et nous avons laissé le retrait se produire à l'air libre ; dans l'autre nous avons adopté le ciment F et nous avons laissé séjourner les lamelles soixante-douze heures dans l'air saturé d'humidité avant de les exposer à l'air libre.

1re *Série.* — Ciment E a l'air libre.

a) *Mélange de caséine au ciment E.*

Nous avons tout d'abord essayé la caséine employée au moyen âge avec la chaux grasse pour les enduits et comme supports de peinture à la fresque.

Voici les résultats obtenus :

	Maximum	Moyen	Date des maxima après gâchage
	—	—	—
Ciment E pur (témoin)....................	9,3	»	»
1 0/0 caséine (eau de gâchage 28,5 0/0) . .	3,5	3,0	160 heures
2 — — — ...	7,5	6,7	208 —
3 — — — ...	11,6	10,4	160 —
4 — — — ...	17,6	15,1	160 —
5 — — — ...	38,5	34	168 —

Il semble résulter que la proportion de 1 0/0 de caséine réduit le retrait dans une forte mesure, 2 0/0 également, 3 0/0 l'augmente plutôt, enfin 5 0/0 l'exagère prodigieusement.

Nous avons observé dans les essais à la caséine un curieux phénomène : cette addition a la propriété de rendre la pâte de ciment fluide et coulante. C'est avec la proportion de 1 0/0 que le phénomène est le plus frappant. On gâche du ciment en pâte ferme, par exemple 100 grammes de ciment avec 30 grammes d'eau. Si on saupoudre cette pâte avec 1 gramme de caséine et que l'on continue à gâcher, on voit, au bout de cinq minutes environ, la pâte s'affaisser, se liquéfier en quelque sorte et couler,

L'action est encore plus nette si l'on ajoute quelques grammes d'ammoniaque, on forme une véritable colle.

Cela permet de diminuer l'eau de gâchage. En effet, nous avons pu aisément gâcher du ciment E avec 26 0/0 d'eau en présence de caséine alors qu'avec 28 0/0 d'eau sans caséine on obtient une

pâte très sèche. L'inconvénient est que cette pâte coule et qu'on ne peut la mouler.

Incidemment nous avons essayé l'influence de la caséine sur le durcissement. Des briquettes ont été confectionnées avec du ciment C additionné de 1 0/0, 0,50 0/0 et 0,25 0/0 de caséine. On a effectué parallèlement un essai témoin avec le ciment C pur.

Voici les résultats obtenus à la traction :

		7 jours	1 mois	3 mois
Ciment C	pâte pure	23,4	35,75	37,08
	mortier 1/3 plastique	19,08	25,83	35,41
Ciment C + 0,25 caséine	pâte pure	24,75	31	33,25
	mortier 1/3 plastique	17,08	22,25	32,66
— 0,50 —	pâte pure	25,08	34,16	39,25
	mortier 1/3 plastique	11,91	16,25	23,66
— 1,00 —	pâte pure	20,25	26,25	22,33
	mortier 1/3 plastique	8	20	42

La caséine diminue donc la dureté des mortiers. Elle nous a paru n'avoir aucune influence sur la perméabilité.

b) *Mélange de sable normal au ciment E.*

Nous n'avons fait qu'un seul essai à 25 0/0 de sable gâché avec 26 0/0 d'eau.

Voici les résultats obtenus :

	Maximum	Moyen	Date des maxima après gâchage
Ciment E pur	9,3	»	»
25 0/0 sable (eau de gâchage 26 0/0)	7	6,5	210 heures

Le retrait est diminué par la présence de cette matière inerte ainsi qu'il fallait s'y attendre.

c) *Addition de formiate de soude.*

Voici les résultats obtenus :

	Maximum	Moyen	Date des maxima après gâchage
Ciment E pur	9,3	»	»
1 0/0 (28,5 0/0 eau de gâchage)	11,1	10,8	166 heures
5 0/0 (26 —)	4,6	4,3	46 —
6 — —	5,8	5,8	212 —
7 — —	2,7	2,6	92 —
8 — —	3,8	3,1	188 —
9 — —	2,3	1,9	140 —
10 — —	4,5	2,9	168 —

Le formiate de soude a donc pour effet de diminuer considérablement le retrait, au moins à partir d'une proportion de 5 0/0. La proportion la plus active serait, d'après ce tableau, 9 0/0, mais on peut constater que 7, 8, 9 et même 10 0/0 de formiate de soude ont en somme des effets très voisins. Voici en détail les tableaux des mesures de l'essai à 10 0/0 de formiate de soude, qui montrent l'influence des variations atmosphériques et l'importance des mesures nombreuses.

	18 h.	42 h.	66 h.	114 h.	138 h.	162 h.	168 h.	210 h.
a)..........	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	0,0
b)..........	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0

Cette flexion, qui ne s'est produite qu'au bout de 168 heures et qui a disparu, a attiré notre attention sur le rôle du formiate ; nous avons pensé que l'influence de ce sel sur le retrait devait provenir de ses propriétés hygroscopiques, cela nous a donné l'idée d'essayer l'effet de l'azotate de soude qui est hygroscopique, et parallèlement celui de l'azotate de potasse qui ne l'est pas.

Voici les résultats obtenus :

d) *Azotate de soude.*

	Maximum	Moyen	Date des maxima après gâchage
	—	—	—
Ciment E pur..................	9,3	»	»
5 0/0 (26 0/0 eau de gâchage)..	6,2	5,5	550 heures
10 — — ..	4,4	3,9	550 —

e) *Azotate de potasse.*

	Maximum	Moyen	Date des maxima après gâchage
	—	—	—
5 0/0 (26 0/0 eau de gâchage)..	8,8	8,7	550 heures
10 — — ..	8,9	7,2	550 —

De ces chiffres on peut déduire :

1° Que le nitrate de soude se comporte à peu près comme le formiate, il diminue fortement le retrait ;

2° Que l'azotate de potasse (non hygroscopique) est presque sans action sur le retrait.

Le formiate de soude agit donc comme sel hygroscopique.

f) *Huile minérale.*

Nous avons mélangé diverses proportions d'huile minérale (oléo-naphte) au ciment E.

Voici les résultats obtenus :

	Maximum	Moyen	Date des maxima après gâchage
	—	—	—
Ciment E pur..................	9,3	»	»
5 0/0 (28,5 0/0 eau de gâchage).	8,3	7,5	166 heures
7 — — .	6,5	5,8	166 —
10 — — .	6,7	6	288 —
15 — — .	5	4,5	166 —

Le retrait est notablement diminué et à peu près proportionnellement à la quantité d'huile ajoutée.

g) *Stéaro-palmitate de chaux.*

Voici les résultats obtenus :

	Maximum	Moyen	Date des maxima après gâchage
	—	—	—
Ciment E pur..................	9;3	»	»
1 0/0 (28,5 0/0 eau de gâchage).	8,3	7,4	720 heures
5 — — .	9,9	9	720 —
10 — — .	10,5	9,6	168 —
15 — — .	10,8	10	310 —
20 — — .	8,6	7,3	310 —

L'effet sur le retrait paraît nul ou à peu près, quelle que soit la quantité de ce produit mélangé au ciment.

h) *Aquabar.*

Ce produit se vend dans le commerce comme augmentant l'imperméabilité. C'est un mélange d'huile de poisson et de silicate alcalin. Nous ne l'avons essayé qu'à faible dose, son prix très élevé ne permettant pas de l'employer pratiquement à plus de 1/2 à 1 0/0 du ciment.

Voici les résultats que nous avons obtenus :

	Maximum	Moyen	Date des maxima après gâchage
	—	—	—
Ciment E pur..................	9,3	»	»
0,6 0/0 (28,5 0/0 eau de gâchage).	8,0	7,3	244 heures
1,0 — — .	9,4	9,0	244 —
1,5 — — .	8,6	»	244 —

Le retrait *n'est pas nettement* diminué.

i) *Cire végétale saponifiée* (brevet Liebold).

Ce produit est recommandé pour corriger le retrait. Nous l'avons préparé selon les brevets de l'auteur, en faisant bouillir 300 grammes de cire végétale et 20 grammes de soude caustique dans 8 litres d'eau. Nous avons obtenu une espèce d'émulsion semblable à de l'eau de savon, mais 200 grammes seulement de cire sur 300 sont entrés en réaction. Nous avons mélangé au ciment 5, 8, 15 grammes de cette émulsion, contenant respectivement $0^g,136$, $0^g,218$, $0^g,408$ de matière active.

Voici les flexions obtenues :

	Maximum	Moyen	Date des maxima après gâchage
	—	—	—
Ciment E pur..................	9,3	»	»
0,136 0/0 (25 0/0 eau de gâchage).	9,7	8,4	44 jours
0,218 — — .	12,8	12,1	44 —
0,408 — — .	11	9,7	44 —

L'effet sur le retrait est nul.

Il est vrai que les proportions sont bien faibles. Nous avons repris cet essai sur le ciment F avec des proportions plus fortes (voir plus loin).

2e *Série*. — Ciment F.

Nous avons renouvelé avec du ciment F les essais de mélange faits avec le ciment E, avec la caséine, le formiate de soude et la cire végétale saponifiée seulement. Comme nous l'avons dit, plus haut, les lamelles ont été exposées soixante-douze heures à l'air humide avant leur exposition à l'air libre.

Voici les résultats que nous avons obtenus :

a) *Caséine*.

	Maximum	Moyen	Date des maxima après sortie de l'air humide
	—	—	—
Ciment F pur.................	18,7	»	»
1 0/0 (28,5 0/0 eau de gâchage).	4,8	4,4	48 heures
2 — — .	9,8	9,5	72 —
3 — — .	16,8	15,4	72 —
4 — — .	12,5	24,6	72 —

Les résultats sont comparables à ceux obtenus avec le ciment E à

l'air libre : diminution pour de faibles proportions, augmentation pour de fortes proportions.

b) *Formiate de soude.*

	Maximum	Moyen	Date des maxima après sortie de l'air humide
	—	—	—
Ciment F pur.................	18,7	»	»
1 0/0 (28,5 0/0 eau de gâchage).	15,3	14,8	144 heures
5 — — .	16,7	15,6	144 —
10 — — .	12,5	9,3	168 —

Ici le retrait a été moins diminué qu'avec le ciment E à l'air libre.

c) *Cire végétale saponifiée.*

	Maximum	Moyen	Date des maxima après sortie de l'air humide
	—	—	—
Ciment F pur...................	18,7	»	»
0,5 0/0 (28,5 0/0 eau de gâchage).	14,0	13,3	48 heures
1,5 0/0 (31 0/0 —).	15,3	14,5	120 —
1,5 0/0 (33 0/0 —).	14,6	14,4	48 —

Il y a peu de différence entre les résultats pour des proportions diverses de ce produit, mais son influence sur le retrait du ciment F est plus importante que sur celui du ciment E.

Comme on le voit d'après ces expériences :

1° Le retrait des ciments augmente avec la finesse de mouture. Le ciment F, qui est une poudre impalpable, présente le plus fort retrait. Le ciment A, le plus grossier de la série, possède un retrait très inférieur. Cette influence n'est cependant pas aussi importante qu'on le supposait.

2° La proportion d'eau de gâchage est presque sans influence sur le retrait.

3° Les ciments prompts prennent sensiblement autant de retrait que les ciments lents. La retrituration ne paraît pas augmenter sensiblement leur retrait.

4° L'exposition préalable à l'air humide, surtout courte, paraît augmenter le retrait ultérieur. Pour éliminer le retrait il est probable qu'il faut la prolonger très longtemps.

5° L'exposition préalable dans une atmosphère d'acide carbonique humide diminue très notablement le retrait.

6° Le mélange des matières inertes, telles que le sable, diminue le retrait.

7° Le mélange de caséine diminue ou augmente le retrait suivant les proportions de cette substance.

8° Le formiate de soude, dans les proportions de 5 à 10 0/0, diminue le retrait. De même l'azotate de soude et probablement tous les sels hygroscopiques.

9° L'huile minérale diminue le retrait.

10° L'aquabar, la cire saponifiée sont sans action.

Des mesures comparatives faites par cette méthode et par la mesure directe du retrait au moyen d'un palmer au 1/100 sur des barrettes de 60 millimètres de longueur, il résulte que les deux méthodes donnent toujours des résultats de même sens.

Depuis aux divers produits essayés, j'ai ajouté l'amiante.

Les résultats sont très curieux, le retrait est considérablement augmenté (tableau XXXIII), cependant, l'addition d'amiante diminue considérablement le fendillement dans les applications.

Tableau XXXIII.

Désignation du produit mis en essai		Lamelles sur clinquant de 130 mill m. de longueur — De l'air humide mis à l'air sec — Air humide — Retrait maximum en millimètres après 4 jours de séjour à l'air humide — Moyenne de 2 lamelles	Lamelles sur clinquant de 130 mill m. de longueur — De l'air humide mis à l'air sec — Air sec de la salle — Retrait maximum en millimètres après 4 jours de séjour à l'air sec — Moyenne de 2 lamelles	Barrettes de 60 mm. sur 20 mm. après 48 heures de gâchage desséchées à l'étuve entre [illegible]0° et 60° jusqu'à retrait constant — Retrait maximum absolu sur la longueur après 4 jours de dessiecation
Ciment CL	pur témoin	0,76	5,76	0,153
	additionné de 5 0/0 d'amiante	0	8,46	0,182
	additionné de 10 0/0 d'amiante	0	8,07	0,169
Ciment EB	pur témoin	0	5,38	0,199
	additionné de 5 0/0 d'amiante	0	9,61	0,2[illegible]0
	additionné de 10 0/0 d'amiante	0	11,53	0,254
Ciment CK	pur témoin	0	3,84	0,233
	additionné de 5 0/0 d'amiante	0	9,23	0,335
	additionné de 10 0/0 d'amiante	0	11,53	0,321

Je n'ai pu trouver à ce phénomène d'explication qui me satisfasse. Il faut cependant en conclure que la mesure du retrait absolu du ciment n'est pas suffisante pour connaître sa propension aux fendillements, ceux-ci dépendant non seulement du retrait, mais aussi de l'élasticité.

Un produit qui a plus de retrait peut fendiller moins qu'un autre. Il faut surtout retenir que le retrait est essentiellement variable suivant l'état hygrométrique de l'atmosphère et qu'il ne s'atténue pas avec le temps.

§ 3. — ALLURE HYPERBOLIQUE DE LA COURBE DE DURCISSEMENT DES MORTIERS HYDRAULIQUES

Une propriété caractéristique des mortiers hydrauliques est l'allure hyperbolique de leur durcissement.

Ayant eu l'idée de rechercher si les résistances en mortier plastique à 7 et à 28 jours ne permettraient pas de calculer la résistance à 84 jours, je suis arrivé à une formule qui est la suivante :

$$R\,84 = K(2R\,28 - R\,7),$$

dans laquelle :

$K = 1$;
$R\,84$ = résistance du mortier à la traction à 84 jours ;
$R\,28$ = — — — 28 jours ;
$R\,7$ = — — — 7 jours.

Comme l'a fait remarquer M. Mesnager, cette formule concorde avec celle admise par la Commission du béton armé :

$$2R\,28 = R\,84 + R\,7.$$

Le coefficient K diffère légèrement d'un produit à l'autre mais il est tellement voisin de 1 pour tous les produits ayant des allures de ciment — depuis les ciments artificiels jusqu'à la chaux maritime — qu'on peut sans grande erreur lui fixer cette valeur pour tous les ciments, ciments prompts exceptés.

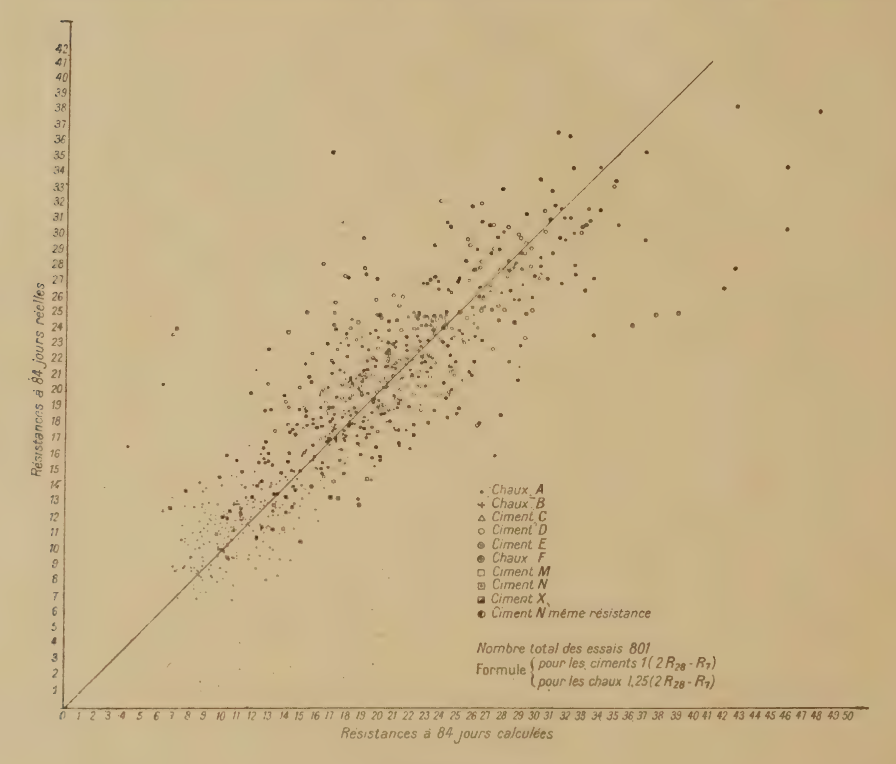
Pour les chaux ordinaires de Lafarge, le coefficient K atteint la valeur 1,28 et celle de 1,23 pour les chaux administratives, moyenne : 1,25. Il varie dans de plus grandes limites pour les diverses chaux de commerce, dont quelques-unes ne sont que des ciments prompts éventés, par exemple : Tournai et Joze.

Comme, d'autre part, pour arriver à une valeur à peu près certaine du coefficient K, il faut un grand nombre d'essais et que je n'avais pas suffisamment de chacune des chaux de commerce pour pouvoir obtenir une certitude suffisante, je me suis borné à étudier :

1° Tous les ciments de Lafarge (blancs, extra-blancs, n° 1, maritimes, artificiels), artificiels du commerce (particulièrement du Boulonnais), ciments de grappiers de marques connues ;

2° Les chaux ordinaires et administratives de la Société de Lafarge.

Pour 801 de ces produits divers, j'ai porté en abscisses les résistances à 84 jours calculées d'après les résistances à 7 et à 28 jours



Graphique II.

au moyen de la formule ci-dessus dans laquelle le coefficient K a été invariablement pris égal à 1 pour les ciments et à 1,25 pour les chaux, et en ordonnées les résistances réellement trouvées à 84 jours en mortier 1:3 plastique. J'ai obtenu ainsi le graphique II dont la reproduction montre qu'à part quelques anomalies tous les points se groupent bien autour de la droite 45°.

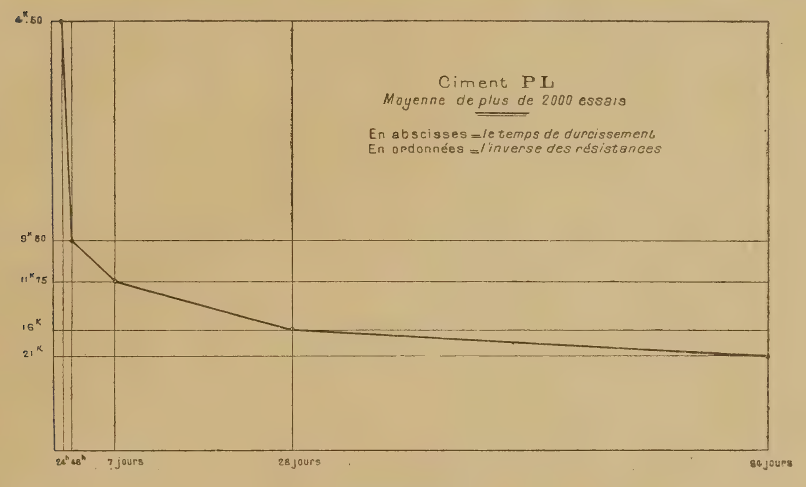
Je pense qu'une formule aussi simple peut donner des résultats intéressants ; elle montre, en tout cas, que l'accroissement de résis-

tance entre 7 et 28 jours et la résistance à 28 jours ont beaucoup plus d'importance dans la prévision des résistances éloignées que la résistance à 7 jours même. En appelant Δ la différence R28 — R7, la formule se met en effet sous la forme :

$$R\,84 = K\,(R\,28 + \Delta).$$

Cette loi hyperbolique du durcissement se retrouve avec une très grande netteté si, portant en abscisses les temps, on porte en ordonnées les inverses des résistances (graphique III).

Je signale également qu'en opérant sur un ciment de même



Graphique III.

nature et en portant en abscisse les résistances à 7 jours et en ordonnées les gonflements (en millimètres d'écartements des aiguilles du cylindre Le Chatelier), les points se groupent également suivant une hyperbole, quoique avec de plus grands écarts dans les variations individuelles du ciment qui n'était pas absolument constant (graphique IV).

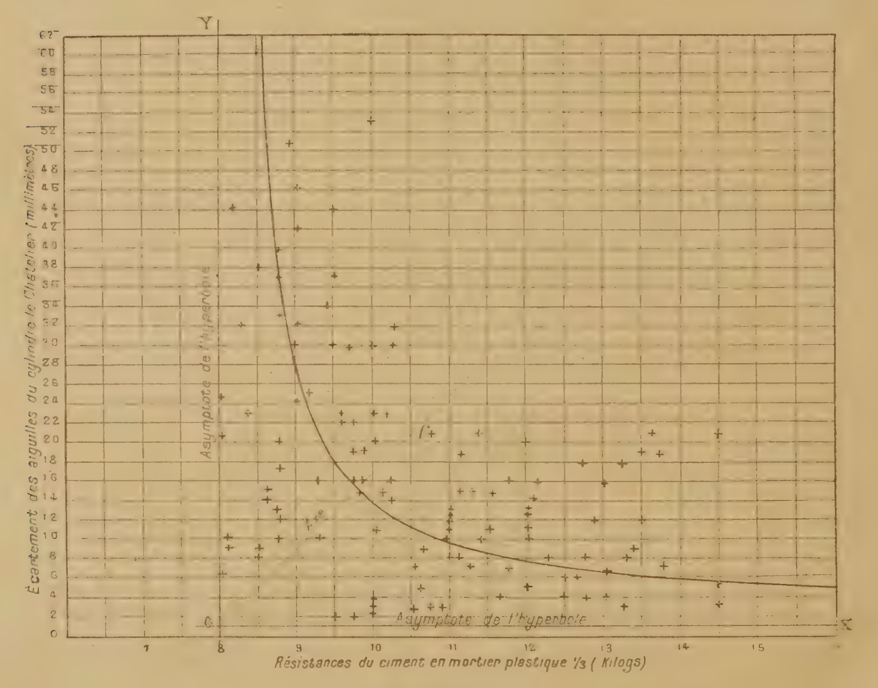
Il y a trois ans, M. Hendrickx, à la suite d'expériences faites à l'usine de Gargenville sur des ciments artificiels à haute résistance, donnait le tableau ci-après des résistances à la traction en mortier 1/3 plastique sur lequel il s'appuyait pour infirmer la loi hyperbolique du durcissement :

	3 jours	7 jours	28 jours	2 mois	3 mois
A la sortie du four.	32,40	35,30	42,30	43,70	55,40
A l'emballage..........	31,30	33,25	34,85	»	53,10

Nous ferons remarquer que, d'après la formule précédemment donnée, on aurait comme résistance à 84 jours, pour la première série d'expériences :

$$(2 \times 42{,}3) - 35{,}3 = 49{,}3.$$

Or à 60 jours, elle est de 43,7, à 90 jours elle est de 55,4, on



Graphique IV.

peut donc admettre 53 comme résistance à 84 jours ; par suite nous ne trouvons qu'une très faible différence avec la formule.

Quant à la deuxième série d'expériences à l'emballage, il paraît un peu extraordinaire que la différence des résistances avec la première série d'expériences, différence qui est de 1^{kg},1 à 3 jours,

2kg,05 à 7 jours et 2kg, 30 à 3 mois, passe à 7kg,45 à 28 jours. Il semble logique d'admettre que cette deuxième série d'expériences soit entachée d'une erreur accidentelle.

On peut peut-être expliquer la loi hyperbolique du durcissement, par ce fait que la quantité de grains attaqués dans le durcissement, des liants hydrauliques est toujours excessivement faible. L'examen microscopique des ciments durcis montre en effet que les aiguilles de chaux cristallisée enrobent les grains de ciment et empêchent tout contact de ceux-ci avec l'eau, ce qui arrête bien entendu toute réaction ultérieure.

CHAPITRE VI

RECHERCHES SUR LES PROCÉDÉS D'ESSAI DES LIANTS HYDRAULIQUES

CHAPITRE VI

RECHERCHES SUR LES PROCÉDÉS D'ESSAI DES LIANTS HYDRAULIQUES

Les divers essais de laboratoire que j'ai exécutés ont eu trait à la comparaison des résultats obtenus soit par différentes méthodes, soit avec la même par différents opérateurs, et aussi à la recherche de nouvelles méthodes.

§ 1. — ESSAIS RELATIFS A LA CONSTANCE DE VOLUME DES CIMENTS

De la comparaison des trois procédés d'essais à l'eau chaude les plus usités : le procédé des cylindres à aiguilles Le Chatelier, celui des épingles de Klebe et celui des pâtes comprimées, dit procédé Prussing-Le Chatelier, il nous a paru que, si les deux premiers procédés ont un grand intérêt pour les laboratoires de réception, ils ne peuvent en revanche servir à diriger une fabrication. Les résultats qu'ils donnent sont trop tardifs. C'est seulement, en effet, vingt-quatre heures après, pour les ciments et quarante-huit heures après avec les chaux que l'on a un résultat, trop tard en tout cas pour pouvoir remédier à une erreur. Le troisième procédé, au contraire, qui donne des résultats immédiats, en deux heures, en une heure même au besoin, a toute la souplesse désirable pour permettre le contrôle de la fabrication. Nous avons été amenés à l'usine du Teil à nous servir constamment de ce procédé tant dans les petits laboratoires spéciaux à chaque usine que dans le laboratoire central.

Il était naturel, dans ces conditions, que nous cherchions à comparer les deux procédés en usage, puisqu'ils restaient tous deux

employés, l'un pour diriger et contrôler la fabrication, l'autre pour faire les essais conformément aux cahiers des charges qui imposent souvent des écartements d'aiguilles inférieurs à 3 millimètres.

Pour la fabrication des pastilles comprimées, nous nous servons simplement d'un moule en fonte de 50 millimètres de diamètre à la base et de 49 millimètres au sommet afin de créer une légère dépouille facilitant le démoulage, et de $4^{cm},5$ de hauteur. On prend 50 grammes de liant qu'on gâche avec les deux tiers de l'eau nécessaire pour obtenir la pâte normale. On remplit le moule à la main, on enlève tout ce qui dépasse et on comprime avec un petit pilon et un marteau. On arrive ainsi, avec l'habitude, à avoir toujours des galettes d'épaisseur à peu près égale, environ 18 millimètres.

Les résultats de ces expériences ont été les suivants :

A. Avec les ciments dont la prise initiale est relativement lente, et plus encore avec les chaux hydrauliques, les gonflements indiqués par les pastilles sont très inférieurs à ceux indiqués par les cylindres.

B. Au contraire, avec les produits à forte résistance initiale, les pastilles donnent des gonflements beaucoup plus forts que ceux indiqués par les cylindres.

L'explication de ce phénomène est facile :

En effet, lorsqu'on immerge des cylindres dans l'eau bouillante, ils ont déjà, les ciments vingt-quatre heures, les chaux quarante-huit heures de séjour à l'eau froide. Or, à cette date, les divers liants ne sont pas du tout dans un état comparable : les uns, comme les chaux viennent à peine de finir leur prise, d'autres peuvent l'avoir finie déjà depuis douze ou dix-huit heures et ont acquis une dureté considérable.

Or, le gonflement que l'on mesure est la résultante de deux efforts inverses :

1° L'effort de gonflement produit par l'hydratation de la chaux libre ;

2° La résistance offerte à ce gonflement par le produit lui-même, résistance d'autant plus importante que le durcissement est plus avancé.

Avec les pastilles, au contraire, cette cause de variation n'existe pas, puisqu'on soumet tous les produits à l'action de la vapeur avant qu'ils n'aient commencé à faire prise.

Ce procédé met entre les mains du fabricant un mode opératoire simple, commode, qui nous semble mériter l'attention mais toutefois nous ne pensons pas qu'il y ait lieu de le préconiser pour des essais de réception. Moins qu'avec les cylindres, on pourait conclure de la mesure des gonflements à des indications sur le danger des expansifs dans l'emploi des produits à froid. Aussi la méthode de l'essai au cylindre à aiguilles Le Chatelier est-elle devenue d'un emploi absolument général, depuis que les essais à l'eau chaude sur les liants hydrauliques sont d'une pratique courante en France.

Des objections avaient été soulevées contre ce procédé par la Commission du temps de prise et MM. Strebel en Allemagne et Cuttler en Angleterre.

Voici la communication que je fis à ce sujet en 1912, au Congrès de New-York de l'Association Internationale pour l'essai des Matériaux.

Si j'ai lu avec assez d'attention les publications sur ce sujet, je crois qu'en laissant de côté la question de savoir si on doit tenir compte ou non du gonflement à l'eau froide avant immersion dans l'eau chaude, question tout à fait indépendante de l'essai lui-même, je crois, dis-je, qu'on peut ramener à trois les objections faites contre l'essai à chaud Le Chatelier :

a) Cet essai amènerait à refuser des ciments qui auraient eu une excellente tenue à l'eau froide ;

b) Si l'essai est fait immédiatement après la mouture, il conduirait à accepter des ciments qui seraient refusés au contraire au cas où l'essai ne serait fait qu'après quinze jours ou un mois d'aération ;

c) Enfin l'essai n'aurait aucune précision et donnerait dans le même laboratoire ou dans des laboratoires différents des résultats peu concordants.

Nous allons examiner une à une ces trois objections.

a) *L'essai Le Chatelier amènerait à refuser de bons ciments.*

Là il faut tout de suite poser la question convenablement et elle paraît ne pas l'avoir été.

Si l'on se place à un point de vue tout à fait général, le reproche est peut-être fondé car j'ai conservé dans mon laboratoire pendant plusieurs mois des ciments ayant donné 50 millimètres d'expansion

aux essais Le Chatelier sans qu'ils aient montré trace de gonflement à l'eau froide.

Si l'on se place au contraire au point de vue du consommateur, le reproche n'est pas fondé pour les deux motifs suivants :

1° L'épreuve H. Le Chatelier paraît éliminer tous les ciments mauvais, et c'est là le principal ;

2° Tous les industriels connaissant leur métier peuvent fabriquer, sans augmentation sensible de prix de revient, des ciments satisfaisant à l'épreuve Le Chatelier.

S'il ne m'appartient pas d'indiquer quels sont les moyens à employer pour obtenir ce résultat, je suis sûr que beaucoup d'industriels, et non des moindres, seront complètement de mon avis.

Dans ces conditions, la question de savoir si l'essai Le Chatelier élimine quelques bons ciments ne devrait même pas être posée par les fabricants. Ce sont les consommateurs qui sont les meilleurs juges des garanties dont ils doivent s'entourer et les industriels ne doivent que renseigner les consommateurs sur les possibilités de la fabrication.

Or dans le cas actuel, la fabrication, sans augmentation de dépenses, d'un ciment satisfaisant aux essais H. Le Chatelier, est possible, et c'est aux consommateurs seuls et non aux fabricants de ciment que doit, semble-t-il, revenir la parole.

b) *L'essai Le Chatelier amènerait à accepter des ciments pouvant être gonflants.*

Il semble, *a priori*, que le fait que des ciments non gonflants après la mouture le deviennent après aération doit se rattacher à l'action du sulfate de chaux, ajouté aux ciments, sur l'aluminate de chaux qu'ils contiennent.

Il y a longtemps que Candlot a montré que des ciments, ralentis par l'addition de gypse, reprenaient une prise rapide après aération.

M. Camermann a attribué à ce phénomène trop méconnu de nombreux accidents.

La société à laquelle je suis attaché, ne fabriquant que des ciments excessivement siliceux qui ne renferment pas plus de 2 à 3 0/0 d'alumine, il était à prévoir que les essais tentés avec ceux-ci seraient moins nets qu'avec les ciments Portland normaux. Ils ne l'ont cependant pas été assez pour qu'on puisse en tenir compte.

Un ciment siliceux témoin a été mélangé avec 1, 2, 3, 5 0/0 de

son poids de gypse. Des essais Le Chatelier ont été faits immédiatement après le mélange, puis après quinze jours de conservation à l'air libre.

Huit cylindres ont été faits sur chaque produit et les cylindres employés étaient neufs et provenaient de la même fourniture. Ils étaient après confection conservés vingt-quatre heures dans l'eau à 17° entre deux lames de verre puis immergés dans l'eau froide d'un bain-marie qui était portée en une demi-heure à la température de 95° et conservés qnatre heures et demie dans le bain-marie à 95°.

Le tableau XXXIV résume les résultats qui indiquent que l'aération diminue le gonflement du ciment témoin et des ciments additionnés de 1 à 2 0/0 de gypse, mais augmente le gonflement de ceux additionnés de 3 à 5 0/0.

Tableau XXXIV. — **Essais à l'eau chaude.**

Influence d'un mélange de gypse au ciment.

	CIMENT A pur (essai témoin)		CIMENT A additionné de 1 0/0 de gypse		CIMENT A additionné de 2 0/0 de gypse		CIMENT A additionné de 3 0/0 de gypse		CIMENT A additionné de 5 0/0 de gypse	
	Nos des cylindres	Écart des aiguilles	Nos des cylindres	Écart des aiguilles	Nos des cylindres	Écart des aiguilles	Nos des cylindres	Écart des aiguilles	Nos des cylindres	Écart des aiguilles
Essai fait immédiatement après le mélange	0	4	9	2	17	2	25	3	33	5
	1	2	10	3	18	3	26	3	34	4
	2	2	11	2	19	3	27	3	35	3
	3	2	12	2	20	3	28	3	36	2
	5	2	13	2	21	3	29	2	37	3
	6	2	14	3	22	3	30	2	38	2
	7	2	15	3	23	3	31	3	39	4
	8	2	16	2	24	3	32	3	40	2
Moyennes		2,25		2,37		2,87		2,75		3,12
Essai fait après 15 jours de conservation à l'air libre	0	1	8	2	16	2	24	2	32	3
	1	2	9	1	17	3	25	3	33	3
	2	2	10	2	18	3	26	4	34	4
	3	1	11	2	19	3	27	4	35	3
	4	0	12	1	20	2	28	3	36	4
	5	3	13	1	21	3	29	4	37	3
	6	3	14	2	22	3	30	3	38	3
	7	2	15	2	23	3	31	3	39	4
Moyennes		1,75		1,62		2,75		3,25		3,37

Mais l'augmentation est trop faible pour considérer les expériences comme définitives.

c) *Le troisième grief fait à l'essai H. Le Chatelier est de manquer de précision.*

Il serait peut-être intéressant de définir tout d'abord ce qu'on entend par précision. Que l'essai Le Chatelier n'ait pas la précision que Regnault recherchait et obtenait dans ses travaux, nul n'en doute, mais qu'il n'ait pas une précision au moins égale à celle des autres essais habituels des liants hydrauliques, cela semble encore à prouver.

En ce qui nous concerne, après une série d'essais faite avec des moules neufs provenant d'une même fourniture, nous avons étudié successivement :

1° L'influence de la largeur des soudures des aiguilles sur les cylindres ;

2° L'influence de l'âge des moules ou plutôt de leur degré d'usage ;

3° L'influence du mode de conservation ;

4° L'influence du temps écoulé entre la fin bien constatée de la prise et l'immersion dans l'eau chaude.

Le tableau XXXV donne les résultats d'une série d'essais faite avec vingt-cinq moules neufs sur quatre produits différents. L'écart maximum obtenu par rapport à la moyenne ne dépasse pas ceux qu'on obtient dans les essais normaux des liants hydrauliques. Encore ne prend-il une certaine importance qu'avec les faibles gonflements, ce qui n'a aucun inconvénient et provient des erreurs fixes de lecture.

Tableau XXXV. — **Essais à l'eau chaude.**

Écarts moyens sur des moules d'une même série.

	NUMÉROS des CYLINDRES	ÉCARTEMENT DES AIGUILLES DES CYLINDRES			
		1er essai	2e essai	3e essai	4e essai
	0	23	14	13	4
	1	23	13	12	4
	2	21	14	12	5
	3	22	15	12	4
	4	21	14	13	5
	5	21	14	11	5
	6	21	14	11	4
	7	21	14	13	5
	8	22	13	11	4
	9	22	14	13	6
	10	21	13	13	5
	11	21	13	14	4
	12	23	15	13	4
	13	22	14	13	6
	14	21	15	13	4
	15	21	13	13	6
	16	21	14	13	6
	17	23	15	13	5
	18	22	13	13	4
	19	21	14	12	4
	20	22	13	11	5
	21	21	13	12	4
	22	21	13	10	5
	23	22	16	10	4
	24	21	13	10	3
Moyennes..........		21,5	13,6	12,2	4,6
Écart maximum.....		1,5	1,6	2,2	1,6
— — 0/0..		6,9 0/0	11,7 0/0	18 0/0	34,7 0/0

1° Comme il était facile de le prévoir, les moules à soudures longues et épaisses, plus rigides que les moules à soudures courtes, indiquent pour un même ciment de moindres gonflements.

	PETITES SOUDURES	GRANDES SOUDURES
Moyenne de 10 cylindres, échantillon A.	34,1	32,5
— 5 — — A.	41,2	38,4
— 5 — — B.	2	2
— 5 — — C.	6	3,6
— 5 — — D.	9,8	7,4

Les essais ont été faits avec des cylindres de même âge; mais les résultats montrent une différence bien moins grande qu'on ne l'imaginerait tout d'abord.

2° Les moules usagés donnent également pour un même produit des gonflements plus importants que des moules neufs. Je regrette de n'avoir pas eu le temps de rechercher si ce phénomène provenait d'une diminution de l'épaisseur du métal ou d'un simple recuit de celui-ci par usage prolongé. Nous avons désigné sous le nom de moules très usagés ceux qui avaient plus de quatre ans de service (un millier d'essais) dans notre laboratoire; de moules moyennement usagés ceux qui avaient plus de deux ans (cinq cents essais); de moules neufs ceux qui avaient moins d'un an (cent essais). Voici les résultats obtenus :

	TRÈS USAGÉS	MOYENNEMENT USAGÉS	NEUFS
Echantillon E	51	50,2	38,2
— F	5	3,25	1,2
— G	5,25	5,3	3,4
— H	9,8	9,6	9

3° Nous avons examiné deux modes de conservation avant immersion dans l'eau chaude :

α) L'immersion des cylindres à l'eau douce pendant vingt-quatre heures entre deux plaques de verre;

β) La conservation des cylindres pendant vingt-quatre heures à l'air humide.

Avec chacun de ces modes de conservation il a été essayé quatre modes d'immersion :

a) Trois heures à l'eau bouillante ;

b) Cinq heures à l'eau bouillante ;

c) Trois heures au bain-marie d'eau bouillante de 95° ;

d) Cinq heures au bain-marie d'eau bouillante de 95°.

Le tableau XXXVI résume les essais [1].

[1] Dans ces quatre modes d'immersion les cylindres étaient placés dans l'eau froide et la température élevée le plus rapidement possible à 100 ou 95° en vingt ou trente minutes. Le temps était mesuré à partir de l'immersion des cylindres, le temps du séjour à l'eau bouillante ou à 95° étant donc de deux heures et demie et quatre heures et demie.

Tableau XXXVI. — **Essais à l'eau chaude.**

Influence du mode de conservation et de traitement.

CIMENT A															
EAU DOUCE								AIR HUMIDE							
Bain-marie				Eau bouillante				Bain-marie				Eau bouillante			
5 heures		3 heures		5 heures		3 heures		5 heures		3 heures		5 heures		3 heures	
Nos des cylindres	Écart des aiguilles	Nos des cylindres	Écart des aiguilles	Nos des cylindres	Écart des aiguilles	Nos des cylindres	Écart des aiguilles	Nos des cylindres	Écart des aiguilles	Nos des cylindres	Écart des aiguilles	Nos des cylindres	Écart des aiguilles	Nos des cylindres	Écart des aiguilles
0	22	6	22	36	21	42	22	12	22	18	20	24	21	30	22
1	22	7	22	37	22	43	21	13	23	19	22	25	23	31	23
2	22	8	22	38	22	44	21	14	23	20	22	26	23	32	20
3	22	9	21	39	22	45	21	15	21	21	23	27	22	33	22
4	22	10	22	40	22	46	22	16	22	22	23	28	23	34	21
5	21	11	22	41	21	47	21	17	22	23	22	29	23	35	21
Moyennes..	21,8	»	21,8	»	21,6	»	21,3	»	22,1	»	22	»	22	»	21

Durée de prise :
Début.......................... 4 heures
Fin............................ 10 —

CIMENT B															
0	3	7	2	25	4	31	3	13	0	19	3	37	1	43	3
1	2	8	2	26	3	32	3	14	1	20	3	38	1	44	3
2	3	9	3	27	4	33	4	15	1	21	3	39	3	45	3
3	3	10	3	28	2	34	3	16	2	22	3	40	3	46	1
5	2	11	2	29	2	35	3	17	3	23	1	41	1	47	1
6	2	12	2	30	2	36	4	18	3	24	2	42	4	48	3
Moyennes..	2,5	»	2,3	»	2,8	»	3,3	»	1,6	»	2,5	»	2,1	»	2,3

Durée de prise :
Début.......................... 6 heures
Fin............................ 15 —

4° Enfin nous avons étudié l'influence de la date d'immersion à l'eau chaude des éprouvettes.

En général on immerge les éprouvettes vingt-quatre heures après le gâchage. Il y avait lieu cependant de penser que les résultats devaient varier suivant le temps qu'on laisserait écouler entre la fin bien constatée de la prise et le moment de l'immersion des

cylindres. Nous avons fait quatre essais, sur des produits ayant des temps de durcissement différents (tableau XXXVII).

TABLEAU XXXVII. — **Essais à l'eau chaude.**

Recherche de l'influence du temps écoulé entre la fin de prise et le moment d'immersion.

CHAUX A								CIMENT A							
Immédiatement après la prise		5 heures après la prise		10 heures après la prise		20 heures après la prise		Immédiatement après la prise		5 heures après la prise		10 heures après la prise		20 heures après la prise	
Nos des cylindres	Écart des aiguilles	Nos des cylindres	Écart des aiguilles	Nos des cylindres	Écart des aiguilles	Nos des cylindres	Écart des aiguilles	Nos des cylindres	Écart des aiguilles	Nos des cylindres	Écart des aiguilles	Nos des cylindres	Écart des aiguilles	Nos des cylindres	Écart des aiguilles
0	9	11	10	21	8	31	5	0	3	9	3	17	2	25	3
1	9	12	10	22	8	32	5	1	2	10	3	18	2	26	3
2	10	13	11	23	8	33	6	2	3	11	2	19	1	27	3
3	9	14	10	24	8	34	5	3	2	12	2	20	2	28	3
5	10	15	10	25	9	35	6	5	3	13	3	21	2	29	3
6	9	16	10	26	9	36	5	6	3	14	3	22	3	30	4
7	9	17	10	27	9	37	6	7	3	15	2	23	3	31	2
8	10	18	10	28	8	38	5	8	2	16	3	24	2	32	2
9	9	19	9	29	8	39	6								
10	10	20	9	30	7	40	5								
Moyennes..	9,4	»	9,9	»	8,2	»	5,4	»	2,6	»	2,6	»	2,1	»	2,8
Prise		Début $7^h 30$			Fin $23^h 30$			Prise			Début $4^h 40$			Fin 10^h	

CHAUX B								CHAUX C							
0	22	11	19	21	15	31	7	0	10	12	7	22	6	32	2
1	22	12	17	22	16	32	6	1	11	13	6	23	7	33	2
2	22	13	18	23	16	33	7	2	10	14	7	24	6	34	2
3	21	14	17	24	15	34	8	3	14	15	8	25	5	35	2
5	21	15	17	25	16	35	7	5	12	16	8	26	5	36	3
6	21	16	17	26	16	36	6	6	14	17	6	27	6	37	3
7	21	17	17	27	15	37	7	7	11	18	6	28	6	38	2
8	21	18	17	28	15	38	7	8	10	19	6	29	6	39	2
9	23	19	16	29	15	39	8	9	11	20	7	20	5	40	2
10	23	20	18	30	16	40	7	10	10	21	8	31	5	41	2
Moyennes..	21,7	»	17,3	»	15,5	»	7,0	»	11,3	»	6,9	»	5,7	»	2,2
Prise		Début $5^h 10$			Fin 13^h			Prise			Début $6^h 15$			Fin 16^h	

De cette série d'essais on peut conclure que la forme de la soudure, l'âge des cylindres, ou plutôt leur degré d'usage, ont une influence sur les résultats obtenus, que le mode d'immersion en a peu, qu'au contraire le temps de conservation entre la fin bien constatée de la prise et l'immersion des éprouvettes dans l'eau chaude a une influence considérable sur les résultats, du moins avec les produits dont le durcissement initial est un peu lent.

C'est en effet une caractéristique de l'essai Le Chatelier qu'il ne donne pas à un moment donné la mesure du gonflement absolu, mais la différence entre l'effort de gonflement et l'effort de résistance que le ciment oppose à ce gonflement grâce à son propre durcissement préalable.

Mais ne peut-on précisément tirer parti de ce fait pour lever les reproches de sévérité excessive faits à l'essai H. Le Chatelier ? Il suffirait d'examiner simplement si le délai de vingt-quatre heures après gâchage convient dans tous les cas, si cette prescription n'est pas quelquefois trop sévère et si en fixant à trente-six heures ou à quarante-huit heures la date de l'essai Le Chatelier à l'eau chaude on aurait encore l'inconvénient d'éliminer les ciments stables à l'eau froide. D'ailleurs le temps au bout duquel doit se faire l'immersion à l'eau chaude n'a, à nos yeux, rien à voir avec la valeur de l'essai ; c'est affaire à chaque employeur de fixer pour chaque genre de fourniture le temps de conservation au bout duquel doit être effectué l'essai Le Chatelier.

Les résultats obtenus ayant d'autre part mis en évidence le peu d'influence du mode d'opération, de conservation et d'immersion à l'eau chaude des éprouvettes et la parfaite concordance des essais faits avec des moules provenant d'une même fourniture on a, à notre avis, le droit de considérer l'essai Le Chatelier comme ayant une précision très suffisante dans la pratique et étant d'un emploi facile et commode. En ce qui concerne la forme des soudures, rien n'est plus facile que de la réglementer, de même qu'on peut fixer un degré d'usage pour la mise au rebut des moules.

Dans ces conditions on peut se demander comment la Commission allemande du temps de prise est arrivée à des conclusions si contraires aux nôtres.

A vrai dire, lorsqu'on examine les tableaux publiés par cette

commission, il semble qu'on puisse en tirer des conclusions absolument contraires à celles qu'on en a déduites.

Ce qui frappe en effet, à la vue de ces tableaux, c'est que toutes les courbes ont la même allure. C'est ainsi qu'un laboratoire donne les résultats maxima pour tous les produits et un autre laboratoire les résultats minima.

Il en résulte qu'il y a entre tous les laboratoires une erreur systématique. Puisque les méthodes d'essai ont été les mêmes dans tous les laboratoires et qu'on ne peut trouver, nous venons de le voir, dans l'imprécision de l'essai l'explication de résultats aussi discordants, on doit chercher ailleurs la cause de l'erreur.

Elle réside, suivant nous, dans ce fait que si on a pris la précaution d'envoyer aux divers laboratoires les ciments dans des boîtes soudées, on a omis celle de fixer le jour où devaient se faire les essais, jour qui aurait dû être le même dans tous les laboratoires.

Tous les fabricants savent en effet que des ciments gonflants perdent leur gonflement en boîte soudée et même parfois très rapidement ; il suffit pour cela qu'ils aient, à l'état d'humidité ou fixées par les silicates acides, de petites quantités d'eau nécessaires à l'extinction de la chaux vive qu'ils contiennent encore. Cette eau se transporte sur la chaux vive à cause de la faible tension de dissociation de la chaux hydratée à la température ordinaire. Si l'on élève la température du ciment ce phénomène se fait très rapidement (moins de deux heures à 100°) [1].

J'ai voulu, à ce sujet, refaire quelques expériences. Elles ont été concluantes (tableau XXXVIII).

Une différence de quelques jours dans la date des essais peut donc amener des résultats très différents même pour une conservation du liant en boîte soudée.

(1) Il faut bien entendu que, sous une forme ou une autre, les ciments contiennent l'eau nécessaire à l'hydratation de la chaux pour pouvoir perdre tout gonflement en boîte soudée. Les ciments qui ne la contiennent pas restent indéfiniment gonflants. A moins d'essai délicat on ne peut savoir, *a priori*, si un ciment gonflant perdra ou non son gonflement.

Tableau XXXVIII. — **Essais à l'eau chaude.**

Influence du temps d'éventement des ciments.

CIMENT A					CIMENT B				
NUMÉROS des cylindres	ESSAIS FAITS SUR UN MÊME ÉCHANTILLON les				NUMÉROS des cylindres	ESSAIS FAITS SUR UN MÊME ÉCHANTILLON les			
	1er déc. 1911	4 déc. 1911	6 déc. 1911	11 déc. 1911		1er déc. 1911	4 déc. 1911	6 déc. 1911	11 déc. 1911
25	27	15	8	8	0	22	14	13	4
26	27	15	8	9	1	23	13	12	4
27	23	15	8	9	2	21	14	12	5
28	27	15	11	8	3	22	15	12	4
29	28	15	14	7	4	21	14	13	5
30	26	15	13	8	5	21	14	11	5
31	26	15	13	7	6	21	14	11	4
32	26	15	13	7	7	21	14	13	5
33	24	14	13	8	8	22	13	11	4
34	26	15	14	7	9	22	14	13	6
35	26	15	14	8	10	21	13	13	5
36	25	15	12	7	11	21	13	14	4
37	27	17	12	7	12	23	15	13	4
38	26	18	10	7	13	22	14	13	6
39	26	17	12	8	14	21	15	13	4
40	26	17	14	8	15	21	13	13	6
41	26	17	12	7	16	21	14	13	4
42	26	17	12		17	23	15	13	6
43	26	16	12	7	18	22	13	13	6
44	26	16	12	8	19	21	14	12	4
45	27	16	12	7	20	22	13	11	5
46	27	16	13	7	21	21	13	12	4
47	25	16	12	8	22	21	13	10	5
48	24	16	13	7	23	22	16	10	4
49	24	16	13	8	24	21	13	10	3
				7					
Moyennes..	25,8	15,7	12	7,56	»	21,5	13,8	12,2	4,6

§ 2. — ESSAIS MÉCANIQUES NORMAUX

A. — Comparaison des mortiers battus et plastiques.

Les prescriptions officielles pour la confection des mortiers normaux ayant été modifiées en France en 1902, j'ai considéré comme indispensable de comparer l'ancien mortier *battu* avec le nouveau, dit *plastique*, pour permettre à volonté l'interprétation des chiffres anciens en fonction des nouveaux, et *vice versa*.

Mortier 1/3 battu. — L'ancien mortier 1/3 battu se composait de 1 partie de liant pour 3 parties de sable.

Il était gâché avec 45 grammes plus 1/6 de P d'eau pour 1 kilogramme de matière (P *indique la quantité d'eau employée pour le gâchage de la pâte pure en consistance normale, sur un kilogramme de poudre*).

Le sable employé pour ce mortier est le sable *normal de Leucate.*

Le sable normal de Leucate se compose de grains passant au tamis de 1^{mm},5 et retenus sur celui de 1 millimètre.

Les moules sont remplis en une seule fois avec un fort excédent de mortier, celui-ci est ensuite battu fortement avec une spatule qui le comprime dans les moules.

La spatule est en fer du poids d'environ 300 grammes.

Mortier 1/3 plastique. — Comme le mortier battu, ce mortier se compose de 1 partie de liant pour 3 parties de sable.

Il est gâché avec 55 grammes plus 1/5 de P d'eau.

Le sable employé est le sable *normal composé de Leucate.*

Le sable normal composé est obtenu au moyen de :

1/3 en poids de grains passant au tamis de 1 millimètre et retenus par un tamis de 0^{mm},5 ;

1/3 en poids de grains passant au tamis de 1^{mm},5 et retenus par le tamis de 1 millimètre ;

1/3 en poids de grains passant au tamis de 2 millimètres et retenus par le tamis de 1^{mm},5.

L'arrêté ministériel du 2 juin 1902 dit au sujet des remplissages des moules :

« Les moules servant à faire des éprouvettes seront remplis en une seule fois, le mortier sera ensuite comprimé à la truelle, mais non damé; puis avec le tranchant de celle-ci on enlèvera l'excédent qui dépassera les bords du moule et on lissera la surface. »

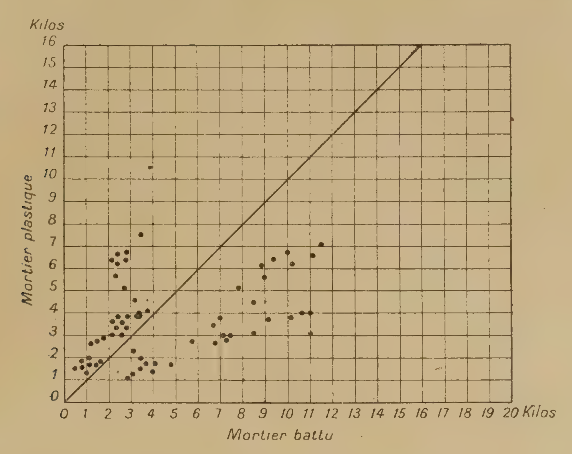
Résumé. — En résumé les deux mortiers sont différenciés :

1° Par la quantité d'eau de gâchage supérieure pour le mortier plastique ;

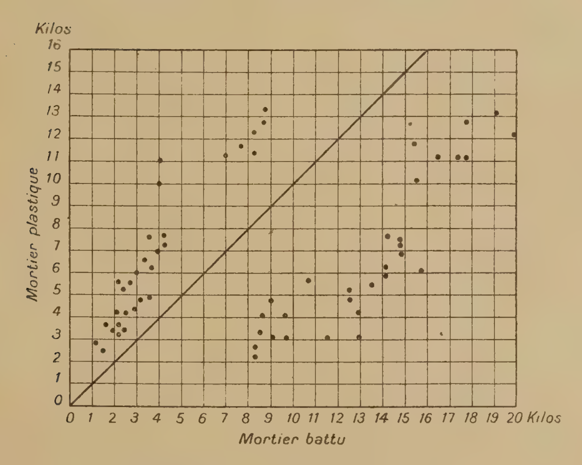
2° Par le sable employé qui n'est pas de même grosseur, tout en étant de bonne qualité ;

3° Par la façon d'introduire le mortier dans les moules.

Caractéristique. — Le mortier battu, comme le montrent les graphiques V et VI et le tableau XXXIX, donne des résistances à 7 jours à



Graphique V. — Résistances à 7 jours.



Graphique VI. — Résistances à 28 jours.

peu près doubles de celles qu'on obtient avec le mortier plastique [1].

(1) Ce résultat est dû à la différence de compacité des deux mortiers.

La compacité des mortiers a été définie et étudiée dans les remarquables travaux de M. Feret, chef du laboratoire des Ponts et Chaussées de Boulogne-sur-Mer (*A. P. C.*, 1899). Il a appelé compacité d'un mortier la somme C + S (chaux ou ciment + sable) des volumes absolus des éléments solides qui entrent dans son unité de volume. Par de très nombreuses expériences sur des mortiers plastiques (seulement) il a établi que la résistance d'un mortier variait avec sa compacité, celle-ci dépendant d'ailleurs de la composition granulométrique du sable, de la quantité d'eau de gâchage, de la nature du liant, etc... Mais si ces diverses conditions peuvent influencer sur la compacité des mortiers et par suite sur leur résistance, combien, à plus forte raison, le travail mécanique du battage qui comprime les mortiers.

TABLEAU XXXIX.

Nos D'ORDRE	MORTIER 1/3 BATTU		MORTIER 1/3 PLASTIQUE	
	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
	kg.	kg.	kg.	kg.
1	7,00	14,30	3,58	7,91
2	7,50	13,50	3,00	5,58
3	7,75	8,50	5,08	11,58
4	8,50	15,62	4,66	10,16
5	9,37	17,75	6,33	11,08
6	9,00	15,75	5,66	11,75
7	10,00	17,87	6,58	12,75
8	11,12	20,00	6,66	12,25
9	8,75	17,50	6,33	11,25
10	10,12	16,50	6,16	11,16
11	11,62	19,12	7,25	13,33
12	8,50	12,75	3,25	5,33
13	11,00	14,12	4,00	6,00
14	10,87	14,62	4,00	6,41
15	9,25	14,75	3,83	7,25
16	6,75	13,00	2,80	3,41
17	11,00	13,00	3,08	4,16
18	7,12	8,87	3,00	4,16
19	10,12	15,83	3,75	6,33
20	5,83	10,75	2,75	5,66
21	6,87	14,62	3,25	7,58
22	7,37	14,89	2,91	7,00
23	3,25	8,50	2,03	2,91
24	3,25	9,75	1,63	3,25
25	3,00	8,50	1,58	2,50
26	3,37	8,87	1,66	3,50
27	3,50	9,37	2,00	3,16
28	4,12	9,87	1,77	4,25
29	3,75	9,25	1,83	4,83
30	4,62	11,62	1,75	3,33
31	4,00	12,62	1,68	4,91
32	16,00	22,50	12,20	18,00
33	13,80	21,50	11,20	17,80

Mais celui-ci se rapproche davantage des mortiers qui sont faits sur les chantiers ; aussi a-t-il été adopté d'une façon générale.

B. — **Comparaison entre gâcheurs différents gâchant le même produit.**

1° *Comparaison entre trois laboratoires différents (V, AM, LT), gâcheurs différents travaillant loin les uns des autres.*

Les essais portèrent sur des chaux et des ciments, que nous désignons par des lettres.

On prélevait un sac de 50 kilogrammes de chacun des produits à essayer comparativement et on le mélangeait à la truelle dans une caisse, de manière à ce qu'on ne puisse pas supposer qu'il y ait eu des différences de résistance d'un point à un autre.

On répartissait 7 à 8 kilogrammes de ce sac entre les trois laboratoires, en les leur faisant parvenir en caisse zinguée et soudée ; nous conservions le reste dans une caisse également zinguée et soudée.

Chaque laboratoire ouvrait ses caisses et effectuait ses essais à la même date, en conservant en caisse soudée la quantité de produit inutilisée.

L'essai se faisait à l'eau potable et conformément aux indications de l'arrêté ministériel du 2 juin 1902, les briquettes en pâte pure et en mortier 1,3 plastique étant gâchées sur une plaque de marbre huilée.

Les briquettes étaient conservées quarante-huit heures pour les chaux et vingt-quatre heures pour les ciments à l'air humide, puis immergées dans l'eau potable. Les températures du milieu de conservation étaient relevées trois fois par jour : à six heures du matin, à midi et à six heures du soir, pendant toute la durée de la conservation, dimanches et jours de fête exceptés, soit avec un thermomètre ordinaire, soit avec un thermomètre enregistreur.

Afin que les essais se fassent normalement, on laissait un intervalle d'une semaine entre l'envoi des divers échantillons.

Le laboratoire LT est très nettement supérieur à V, et encore plus à AM. Ce dernier donne, en effet, des résultats de 50 0/0 inférieurs à ceux de LT (tableau XL).

2° *Comparaison entre deux laboratoires différents* (*LT et LH*), *gâcheurs différents travaillant loin les uns des autres.*

Ces essais portèrent sur un seul produit, une chaux, et étaient effectués sur le programme suivant :

Au départ de trois bateaux destinés à l'administration, on prélevait un sac de chaux (l'administration en faisait de même à l'arrivée). Ce sac était par nos soins bien homogénéisé à la truelle, comme dans l'essai précédent.

Nous adressions 7 à 8 kilogrammes de ce sac à l'administration, en caisse de bois zinguée, le reste étant conservé au laboratoire en boîte zinguée.

TABLEAU XL. — **Essais comparatifs entre les laboratoires AM-V-LT.**

DÉSIGNATION DES PRODUITS mis en essai	TEMPÉRATURE MOYENNE de l'eau d'immersion			EAU de GACHAGE			ESSAI de PRISE						RÉSISTANCES A L'ARRACHEMENT											
													PATE PURE						MORTIER 1,3 PLASTIQUE					
													7 jours			28 jours			7 jours			28 jours		
	AM	V	LT	AM	V	LT	AM		V		LT		AM	V	LT	AM	V	LT	AM	V	LT	AM	V	LT
	degrés	degrés	degrés	0/0	0/0	0/0	heures début	heures fin	heures début	heures fin	heures début	heures fin	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.
Chaux N..........	16,05	17,90	16,86	47	50	45	4	96	6,50	18	6,25	46,15	1,10	2	3,66	6,20	7,50	7	1,20	1	2	5,40	4,25	7,33
— NN........	16,29	17,26	16,70	45	47,5	45	7,05	20	8	15,30	6,15	29	2,25	3	4,12	6	10,00	8	2	1,65	3,87	6	7	8,25
— SL.........	16,48	17,68	16,66	44	50	45	5,05	15	7	24	5,40	25	2	2,50	3,50	5,20	8,62	8,50	0,92	1,65	2,75	4,20	5,12	6,50
— SJ.........	15,81	17,05	16,41	43	50	45	2,50	14	7	24	9	26,5	2,70	2	3,33	5,90	7,25	8,50	2,50	1,50	2,50	6,20	4,62	7,25
— AL........	15,42	16,8	16,37	41	41	41	3,45	12	7	15,10	4,45	16,48	4,90	7,12	6,25	8,70	13,62	12,00	3,90	3,87	5,12	7,40	9,75	9,33
— M.........	14,83	16,12	16,79	41	40	39	4,30	10	6,20	14,10	4,15	12,45	6,80	13,25	12,25	12,20	20,75	18,33	6,50	9,12	10,25	14	13,50	16,33
Ciment L.........	14,63	17,91	17,16	33	33	33	3,50	20	5,40	9,40	5,40	9,50	15,00	19,62	20,50	22,00	30,50	25,33	8,20	10,12	14,25	12	16,33	20,50
— M.........	14,55	15,10	17,29	31	31	31	3,35	10	5	7,40	4	11,35	30,00	36,75	31,66	31,00	45,25	38,16	14,20	21,25	20,43	16,50	24,00	28,50

Quinze jours, jour pour jour, après la date de l'expédition, dont nous avions prévenu l'administration, on ouvrait la boîte et on faisait l'essai.

L'essai se faisait à l'eau potable et conformément aux indications de l'arrêté ministériel de 1902, les briquettes en mortier 1/3 plastique étant gâchées sur une plaque de marbre huilée.

Les briquettes étaient conservées vingt-quatre heures à l'air humide, puis immergées à l'eau potable. Les températures du milieu de conservation étaient relevées trois fois par jour, soit avec un thermomètre ordinaire, soit avec un thermomètre enregistreur, mais vérifiés préalablement au moyen d'un thermomètre ordinaire du commerce et portant le bulletin de contrôle du Laboratoire des Arts et Métiers.

Nous résumons au tableau XLI les résultats de ces essais, les lettres LT désignant le Laboratoire central de l'usine du Teil et les lettres LH celui de l'administration.

Cet essai a été répété trois fois sur trois fournitures différentes du même produit :

1° *Densité.* — Elles sont toujours un peu plus fortes à LH qu'à LT. Cette erreur systématique est due à ce que le produit se tassait dans le voyage prolongé pour parvenir au laboratoire LH.

2° *Eau de gâchage.* — La proportion d'eau de gâchage est très sensiblement la même. Elle a cependant été trouvée en général un tout petit peu plus faible par LH. Cela vient sans doute de l'accroissement de densité signalé ci-dessus.

3° *Prise.* — Les débuts de prise concordent en moyenne à une demi-heure près. Les fins de prise, dont la mesure n'offre pas une grande précision, sont plus longues au Laboratoire LH, de trois à quatre heures.

4° *Températures.* — Elles ont différé généralement de moins de 1°. Cette circonstance favorable permet de penser que les différences de résistances ne proviennent pas de différences de températures.

5° *Résistances.* — Les résistances sont toutes plus élevées, tant à 7 jours qu'à 28 jours, au laboratoire LT qu'au laboratoire LH.

Deux essais donnent des résultats à peu près concordants : le deuxième et le sixième du tableau.

Dans les autres essais, les résultats du laboratoire LT sont supé-

TABLEAU XLI. — **Essais comparatifs entre les laboratoires LT et LH.**

DÉSIGNATION DES ÉCHANTILLONS			ESSAIS FAITS AU LABORATOIRE LT									ESSAIS FAITS AU LABORATOIRE LH								
			Densités	Eau de gâchage	Cylindre	Prise sous l'eau		Moyenne des températures		Résistances du mortier 1/3 plastique à l'arrachement (moyenne des 4 meilleures briquettes).		Densités	Eau de gâchage	Cylindre	Prise sous l'eau		Moyenne des températures		Résistances du mortier 1/3 plastique à l'arrachement (moyenne des 4 meilleures briquettes).	
						heures début	heures fin	à l'air	sous l'eau	7 jours	28 jours				heures début	heures fin	à l'air	sous l'eau	7 jours	28 jours
				0/0	mm.			degrés	degrés	kilog.	kilog.		0/0	mm.			degrés	degrés	kilog.	kilog.
Échantillons de chaux prélevés sur barque n° 1.	au départ par le *laboratoire LT.*	1er essai.	0,804	42	0	4.10	18.30	17 26	16 73	6,25	12	0,838	41	1	6	18	16 7	15 8	4.50	9.10
		2e essai.	0,780	42	0	6.[illegible]	18.[illegible]	15 11	14 25	4,75	9,75	0,830	41,5	1	6	24	16 5	15 6	4.40	9.70
	à l'arrivée par le *laboratoire LH.*	1er essai.	0,795	42	0	6	18	16 83	14 51	4,87	8,25	0,808	41,5	1	6,30	20.30	16 1	15 5	3.70	7.90
Échantillons de chaux prélevés sur barque n° 2.	au départ par le *laboratoire LT.*	1er essai.	0,780	42	1	5.45	19.25	16 61	15 79	6,25	10	0,830	41,5	1	5	20	16 54	15 63	3,90	7,70
		2e essai.	0,755	42	0	5,46	14	19 19	18 26	4,75	10,75	0,825	42	1	6	18	18 9	17 3	3,60	8,70
	à l'arrivée par le *laboratoire LH.*	1er essai.	0,79[illegible]	42	0	8	21,40	15 64	14 26	4	8	0,805	41,5	1	6,30	24	16 5	15 7	3,60	7.20
Échantillons de chaux prélevés sur barque n° 3.	au départ par le *laboratoire LT.*	1er essai.	0,765	42	4	5,35	16,55	16 81	16 02	6,80	9	0,840	42	1	5	23	16 4	15 6	3,70	7,90
	à l'arrivée par le *laboratoire LH.*	1er essai.	0,808	42	0	6,15	16,35	17 94	16 70	6,50	13,33	0,820	35,5	0,6	4	18	17 5	16 5	4.50	11.20
		2e essai.	0,800	35	0	3.45	9.10	19 79	18 89	6	12,50	0,825	35,5	0	4	18	19	17 6	4.90	11,80

rieurs, à 7 jours, au minimum de 1 kilogramme, au maximum de $2^{kg},8$, et à 28 jours, au minimum de $0^{kg},35$ et au maximum de de $2^{kg},9$.

La concordance est donc un peu meilleure à 28 jours qu'à 7 jours. Si l'on fait la moyenne générale, l'écart est, à 7 jours, de $1^{kg},86$, et à 28 jours de $1^{kg},27$, en faveur du laboratoire LT.

3° *Comparaison entre gâcheurs différents gâchant à côté l'un de l'autre, chacun à sa manière.*

J'ai effectué des essais comparatifs dans mon laboratoire même entre un gâcheur d'un laboratoire étranger B et un gâcheur de mon laboratoire A, travaillant à côté l'un de l'autre, mais chacun à sa manière.

Cela ne veut pas dire qu'ils gâchaient d'une façon arbitraire, mais que, tout en procédant suivant les instructions de la commission des méthodes d'essai, il y avait de petites variantes.

Ces variantes étaient les suivantes :

1° Le gâcheur B employait une truelle flexible et gâchait avec une seule main ; le gâcheur A gâchait avec une truelle de maçon ordinaire, rigide, et en s'aidant de la main gauche ;

2° Les moules du gâcheur B, au lieu d'être posés sur un papier mouillé, étaient posés sur la plaque de marbre préalablement huilée ;

3° Le remplissage des moules se faisait en une seule fois, mais était complété par une petite addition de matière après évacuation des bulles d'air ;

4° Le secouage pour l'évacuation de ces bulles d'air était beaucoup plus prolongé par le gâcheur B que par le gâcheur A.

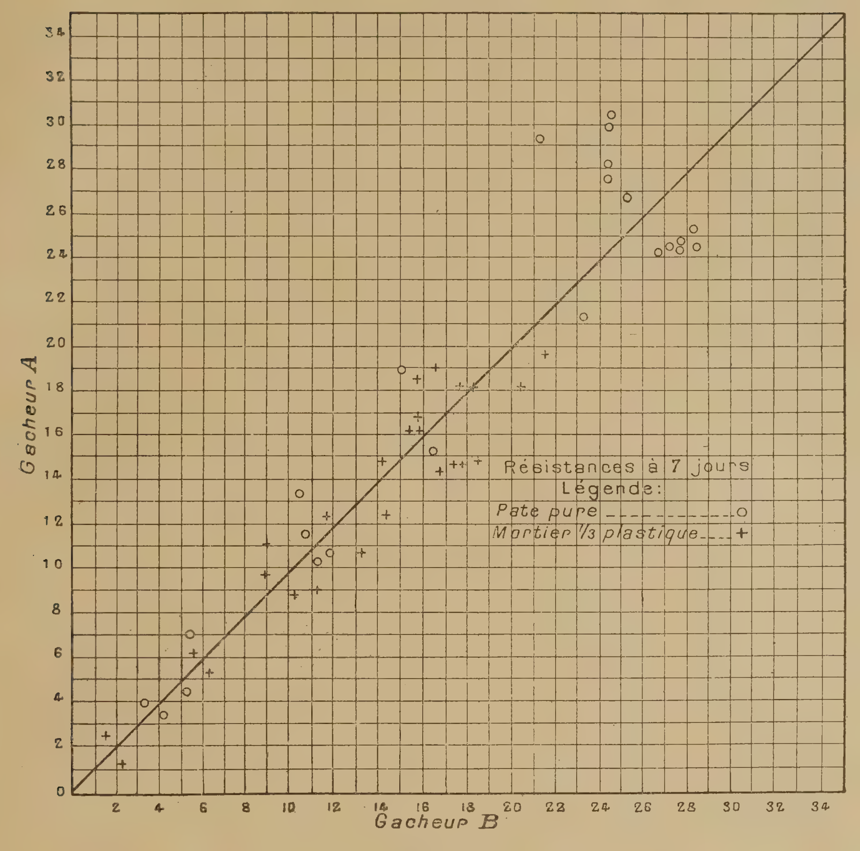
La concordance a été parfaite pour la densité, la finesse et la proportion d'eau de gâchage. Elle a été en général satisfaisante pour la prise.

Au point de vue des résistances, celles obtenues par le gâcheur B sont nettement inférieures à celles du gâcheur A, de 18,9 0/0 pour la pâte pure et de 8,5 0/0 pour le mortier, à 7 jours, si l'on compare à la moyenne des deux gâcheurs (tableau XLII, graphique VII).

En général, les briquettes du gâcheur A étaient plus lourdes que celles du gâcheur B, mais la différence était faible cependant.

TABLEAU XLII. — **Essais comparatifs de gâchage entre deux opérateurs différents.**

DÉSIGNATION des ÉCHANTILLONS	GACHEUR A												GACHEUR B											
	Poids des briquettes		Densités	Finesse à 4.900 mailles	Eau de gâchage	Cylindre	Prise		Résistances à 7 jours				Poids des briquettes		Densités	Finesse à 4.900 mailles	Eau de gâchage	Cylindre	Prise		Résistances à 7 jours			
									Arrachement		Écrasement										Arrachement		Écrasement	
	pâte pure	mortier 1/3 plastique					Début	Fin	pâte pure	mortier 1/3 plastique	pâte pure	mortier 1/3 plastique	pâte pure	mortier 1/3 plastique					Début	Fin	pâte pure	mortier 1/3 plastique	pâte pure	mortier 1/3 plastique
	gr.	gr.		0/0	0/0	mm.	h.	h.	kg.	kg.	kg.	kg.	gr.	gr.		0/0	0/0	mm.	h.	h.	kg.	kg.	kg.	kg.
Ciment CG	»	»	0,960	2	32	12	2,15	11,15	29,25	14,75	268	15[illegible]	»	»	0,960	2	32	12	2,15	11,15	21,25	10,6[illegible]	188	129
Ciment CM	»	»	0,950	0,5	33	15	0,55	10,10	35	19	347	22[illegible]	»	»	0,950	0,5	33	15	0,55	10,10	24,87	19,50	320	289
Ciment C¹G¹	»	»	0,970	0,9	31,5	18	3,40	10,10	28,16	16,25	287	17[illegible]	»	»	0,970	0,9	31,5	18	3,40	10,10	24,41	15,41	262	165
Ciment CE	142	168,66	0,940	1,8	33	2	3,50	10,20	26,75	18,50	254	204	143	165,66	0,940	1,9	33	2	4,05	12,55	25,33	15,75	215	197
Ciment C¹M¹	135,16	166	0,820	0	37	4	2,55	10,10	18,91	12,25	170	14[illegible]	134,66	159	0,805	0	37	5	4,00	11,00	15,08	12,50	144	145
Chaux OL	126,5	156	0,755	25	45	1	7,30	34,00	4	2,50	24	[illegible]	125,66	157	0,755	25	45	»	10,05	41,45	3,33	1,41	17	6
Ciment C³G²	145	164,5	0,965	0,6	31,5	5	3,20	10,25	29,91	18,25	282	19[illegible]	145,83	169,16	0,960	0,6	31,5	7	3,20	10,35	24,50	18,2[illegible]	288	201
Ciment C³G³	144,66	167,5	1,000	0,9	31,5	10	2,20	11,35	30,50	16,91	287	159	143	165,5	0,995	1,1	31,5	12	2,50	12,00	24,66	15,75	280	161
Chaux ML	131,33	163,66	0,738	0,3	40	0	4,35	12,50	13,25	11,08	117	128	129,66	158,33	0,750	0,4	40	0	4,55	13,20	10,40	9,00	94	98
Chaux AL	128,83	162,16	0,790	1,9	42	0	4,35	16,05	7	6,25	41	36	126,66	159	0,790	1,9	42	0	5,55	16,55	5,41	5,58	37	34
Ciment G⁴G⁴	146	162,5	0,965	1,0	31	3	2,25	8,45	27,58	16,25	272	252	143,66	170,50	0,950	1,0	31	4	2,45	10,05	24,25	15,83	271	160
Ciment EB	132,5	163	0,763	0	42	2	4,00	13,10	11,66	9,75	80	84	128	157,33	0,763	0	42	2	4,30	14,30	10,75	8,91	76	77



Graphique VII.

Le tableau XLIII montre que les briquettes du gâcheur A étaient généralement plus régulières que celles du gâcheur B.

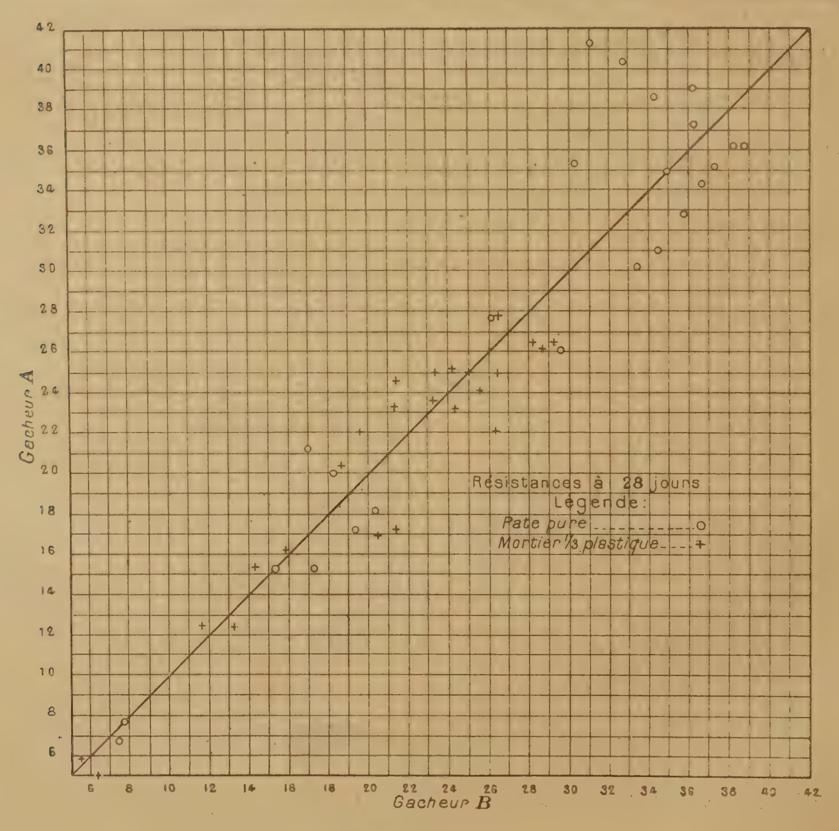
Ce tableau donne l'écart maximum par rapport à la moyenne dans chacune des gâchées de chaque opérateur. Les écarts du gâcheur B sont de 5 0/0 plus forts que ceux de A.

Le temps corrige peu à peu les différences qui vont s'atténuant comme le montrent les tableaux XLIV-XLV et les graphiques VIII et IX des résultats à 28 jours et à 84 jours.

Tableau XLIII.

Écarts maximums par rapport à la moyenne des résistances à 7 jours, des essais comparatifs faits par les gâcheurs A et B.

Désignation des produits	Gacheur A		Gacheur B	
	Matière pure	Mortier 1/3 plastique	Matière pure	Mortier 1/3 plastique
Ciment CG	11,45 0/0	8,47 0/0	15,29 0/0	12 0/0
— CM	11,42	7,89	16,60	7,69
— C'G'	4,75	23,07	14,70	5,90
— CE	12,14	21,63	8,56	7,93
— C'M'	8,40	18,36	3,84	12
Chaux OL	12,50	40,00	9,90	41,84
Ciment C^2G^2	9,72	15,06	14,28	12,32
— C^3G^3	8,19	15,31	7,46	33,33
Chaux ML	9,42	14,25	20,19	16,66
— AL	14,28	12	35,30	34,40
Ciment C'G'	21,53	10,76	17,52	16,86
— EB	11,49	23,07	11,62	23,45
Moyennes	11,27 0/0	17,40 0/0	14,60 0/0	18,69 0/0



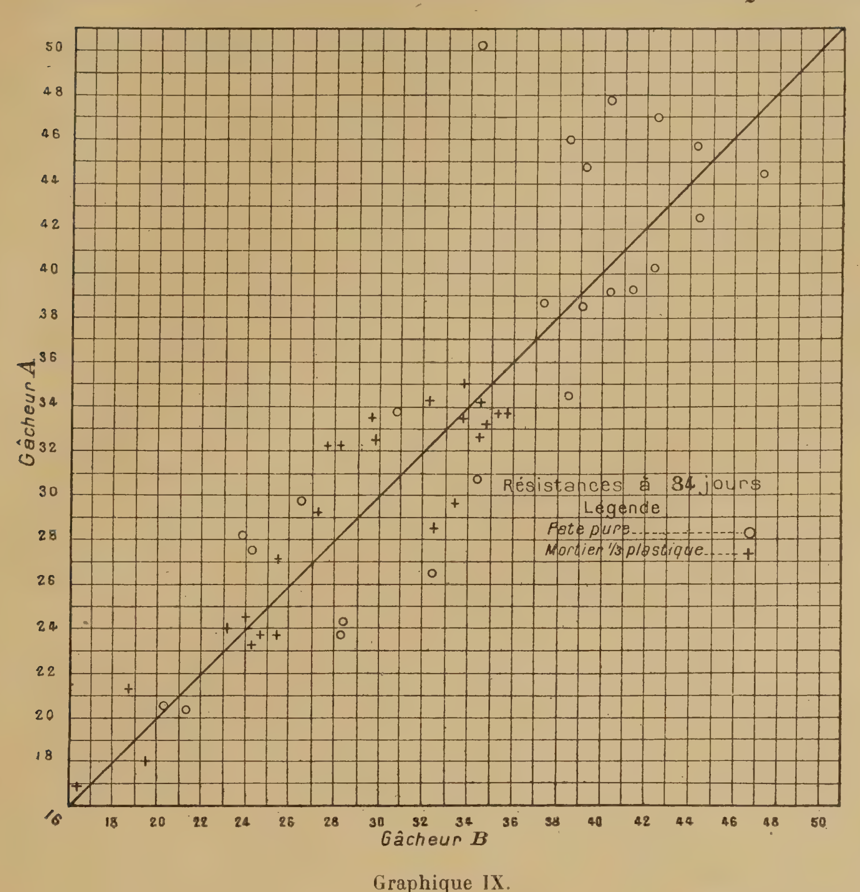
Graphique VIII.

TABLEAU XLIV. — **Essais comparatifs entre les gâcheurs A et B** (résistances à 28 jours.)

DÉSIGNATION des ÉCHANTILLONS	COMPARAISON DES RÉSISTANCES A 28 JOURS A L'ARRACHEMENT				ÉCARTS MAXIMUMS PAR RAPPORT A LA MOYENNE DES BRIQUETTES			
	Gâcheur A		Gâcheur B		Gâcheur A		Gâcheur B	
	pâte pure	mortier 1/3 plastique	pâte pure	mortier 1/3 plastique	pâte pure	mortier 1/3 plastique	pâte pure	mortier 1/3 plastique
	kg.	kg.	kg.	kg.	0/0	0/0	0/0	0/0
Ciment CG	35,25	20,33	30,50	18,75	10,69	8,21	9,83	12
— CM	39	25	36,12	26,50	10,25	10	5,24	5,66
— C^1G^1	40,33	24,58	32,83	21,58	5,37	18,63	12,70	16,59
— CE	34,91	23,66	35,08	23,33	29,81	9,12	5,47	7,84
— C^1M^1	27,66	22,08	26	26,25	10,26	9,42	21,15	11,14
Chaux OL	7,75	5,83	7,83	5,65	22,58	11,49	10,50	32,50
Ciment C^2G^2	41,16	27,87	31,10	26,40	16,61	7,64	17,36	17,42
— C^3G^3	37,08	25,08	36,16	25,00	9,57	6,29	10,12	6,00
Chaux ML	21,16	16,16	17,00	16,91	13,42	11,38	26,47	6,85
— AL	15,16	12,50	15.08	12,33	3,69	20	7,16	6,73
Ciment C^4G^4	38,66	23,08	34,25	24,16	14,64	24,17	15,32	11,75
— EB	20,00	15,41	18,25	17,25	20	9,14	13,51	10,14
Moyennes					13,90	12,12	12,91	12,04

TABLEAU XLV. — **Essais comparatifs entre les gâcheurs A et B** (résistances à 84 jours.)

DÉSIGNATION des ÉCHANTILLONS	COMPARAISON DES RÉSISTANCES A 84 JOURS A L'ARRACHEMENT				ÉCARTS MAXIMUMS PAR RAPPORT A LA MOYENNE DES BRIQUETTES			
	Gâcheur A		Gâcheur B		Gâcheur A		Gâcheur B	
	pâte pure	mortier 1/3 plastique	pâte pure	mortier 1/3 plastique	pâte pure	mortier 1/3 plastique	pâte pure	mortier 1/3 plastique
	kg.	kg.	kg	kg.	0/0	0/0	0/0	0/0
Ciment CG	46	32,50	38,50	29,75	9,78	21,53	15,58	22,68
— CM	38,62	29,16	39,12	32,62	16,52	17,69	28,20	4,96
— C¹G¹	47,75	34,25	40,25	34,58	14,13	9,48	15,52	5,55
— CE	47	32,42	42,58	33,41	8,51	10,53	6,07	8,70
— C¹M¹	33,80	27,16	30,83	28,66	8,28	22,31	16,76	9,28
Chaux OL	20,66	16,83	20,33	18	12,87	16,81	8,21	11,11
Ciment C²G²	45,75	33,50	44,25	33,75	2,73	1,49	11,86	12,59
— C³G³	50,25	35,00	34,50	33,75	15,42	5,71	13,33	3,70
Chaux ML	27,66	21,33	24,25	23,83	13,23	10,92	15,46	16,72
— AL	28,16	24	23,83	23,16	13,63	16,66	20,27	9,32
Ciment C⁴G⁴	44,83	32,33	39,16	33,16	16,23	22,67	25,12	9,52
— EB	29,83	24,66	26,50	23,83	7,37	13,54	9,43	11,87
Moyennes					11,55	14,11	15,48	10,50



Graphique IX.

4° Comparaison entre gâcheurs différents gâchant à côté l'un de l'autre tous deux exactement de la même façon.

Les deux mêmes gâcheurs que ci-dessus ont refait des essais sur les mêmes produits, mais cette fois en adoptant exactement la même façon de procéder, dans les moindres détails (tableaux XLVI-XLVII, graphique X; tableaux XLVIII-XLIX, graphiques XI et XII).

Dans ce cas, les résultats sont aussi concordants qu'ils peuvent l'être.

En faisant le total des résistances obtenues par le gâcheur A et par le gâcheur B, on arrive pour les résultats à 7 jours à des chiffres identiques, tant pour la pâte pure que pour le mortier. Les erreurs

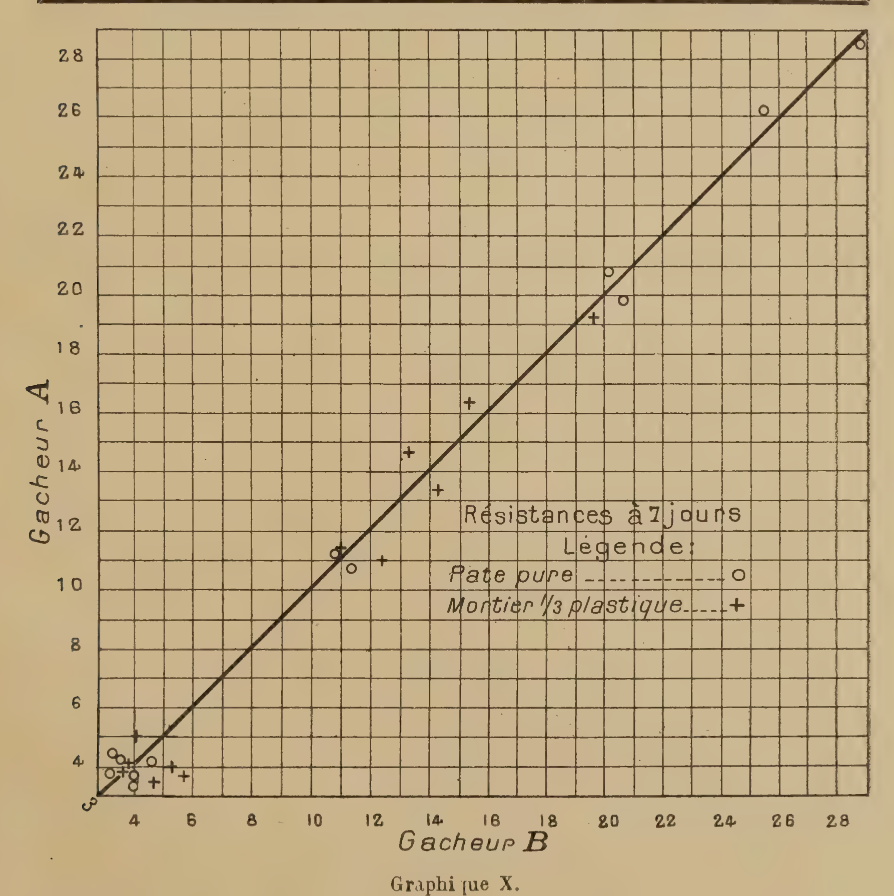
Tableau XLVI. — **Essais comparatifs de gâchage entre les gâcheurs A et B.**

(Résistance à 7 jours.)

DÉSIGNATION des ÉCHANTILLONS	GÂCHEUR A — Poids des briquettes — pâte	GÂCHEUR A — Poids des briquettes — mortier 1/3 plastique	GÂCHEUR A — Densité	GÂCHEUR A — Finesse à 4.900 mailles	GÂCHEUR A — Eau de gâchage	GÂCHEUR A — Cylindre	GÂCHEUR A — Prise — Début	GÂCHEUR A — Prise — Fin	GÂCHEUR A — Résistance à 7 jours — Arrachement — pâte pure	GÂCHEUR A — Résistance à 7 jours — Arrachement — mortier 1/3 plastique	GÂCHEUR A — Résistance à 7 jours — Écrasement — pâte pure	GÂCHEUR A — Résistance à 7 jours — Écrasement — mortier 1/3 plastique	GÂCHEUR B — Poids des briquettes — pâte	GÂCHEUR B — Poids des briquettes — mortier 1/3 plastique	GÂCHEUR B — Densité	GÂCHEUR B — Finesse à 4.900 mailles	GÂCHEUR B — Eau de gâchage	GÂCHEUR B — Cylindre	GÂCHEUR B — Prise — Début	GÂCHEUR B — Prise — Fin	GÂCHEUR B — Résistance à 7 jours — Arrachement — pâte pure	GÂCHEUR B — Résistance à 7 jours — Arrachement — mortier 1/3 plastique	GÂCHEUR B — Résistance à 7 jours — Écrasement — pâte pure	GÂCHEUR B — Résistance à 7 jours — Écrasement — mortier 1/3 plastique
	gr.	gr.		0/0	0/0	mm.	h.	h.	kg.	kg.	kg.	kg.	gr.	gr.		0/0	0/0	mm.	h.	h.	kg.	kg.	kg.	kg.
Ciment CE..	140	169	0,890	1,5	33	0	3 10	8 15	20,75	14,75	139	157	139	168	0,890	1,5	33	0	3 10	8 25	20,08	13,33	187	137
Ciment CM..	121	170	0,890	0,5	33	1	3 10	8 20	26,10	16,41	225	160	120	170	0,889	0,7	33	1	3 25	9	28,80	19,16	261	188
Ciment EB..	130	164	0,786	0,6	42	1	4 15	12 20	11,25	11,50	90	110	129	161	0,785	0,6	42	1	4 25	12 50	10,91	11	100	109
Chaux OL..	120	158	0,783	12,2	45	6	5 10	29 50	4,50	5	24	27	119	158	0,731	11,7	45	6	6	30 10	3,41	4,08	13	21
Chaux O¹L¹.	130	162	0,760	15,5	45	1	5 20	29 20	3,66	4,08	18	24	126	162	0,765	13,5	45	1	5 35	30	4,08	3,91	19	24
Chaux O²L².	124	150	0,780	13	45	2	5 35	28 35	4,25	3,83	23	18	124	151	0,775	13,4	45	3	5 35	29 15	3,58	3,83	19	18

Tableau XLVII. — **Écarts par rapport à la moyenne des résistances à 7 jours, des essais comparatifs faits par les gâcheurs A et B.**

DÉSIGNATION des PRODUITS	GACHEUR A		GACHEUR B	
	MATIÈRE PURE	MORTIER 1/3 plastique	MATIÈRE PURE	MORTIER 1/3 plastique
	0/0	0/0	0/0	0/0
Ciment CE	13,25	8,47	12,05	10
Ciment CM	13,79	3,59	11,11	8,66
Ciment EB	11,11	17,39	10	13,63
Chaux OL	33,33	10	31,96	14,21
Chaux O^1L^1	9,28	14,21	14,21	15,08
Chaux O^2L^2	17,64	17,49	25,69	17,49
Moyennes	16,4	11,85	17,50	13,17

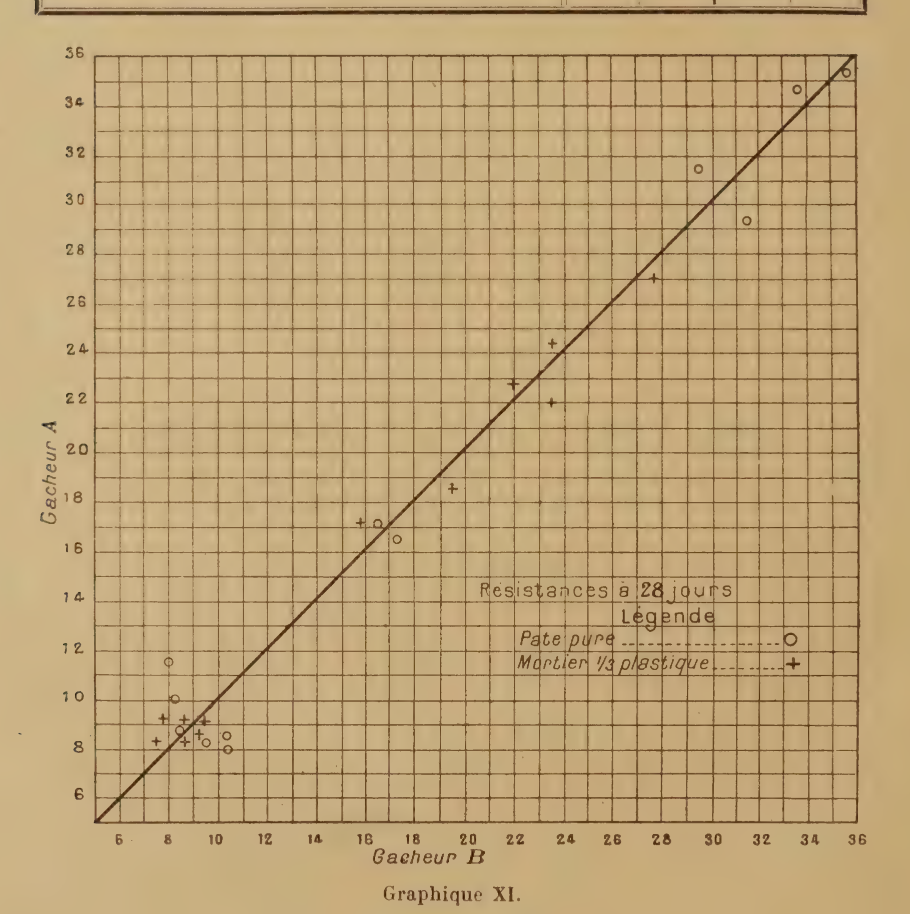


Graphique X.

Tableau XLVIII. — **Essais comparatifs entre les gâcheurs A et B.**

(Résistances à 28 jours.)

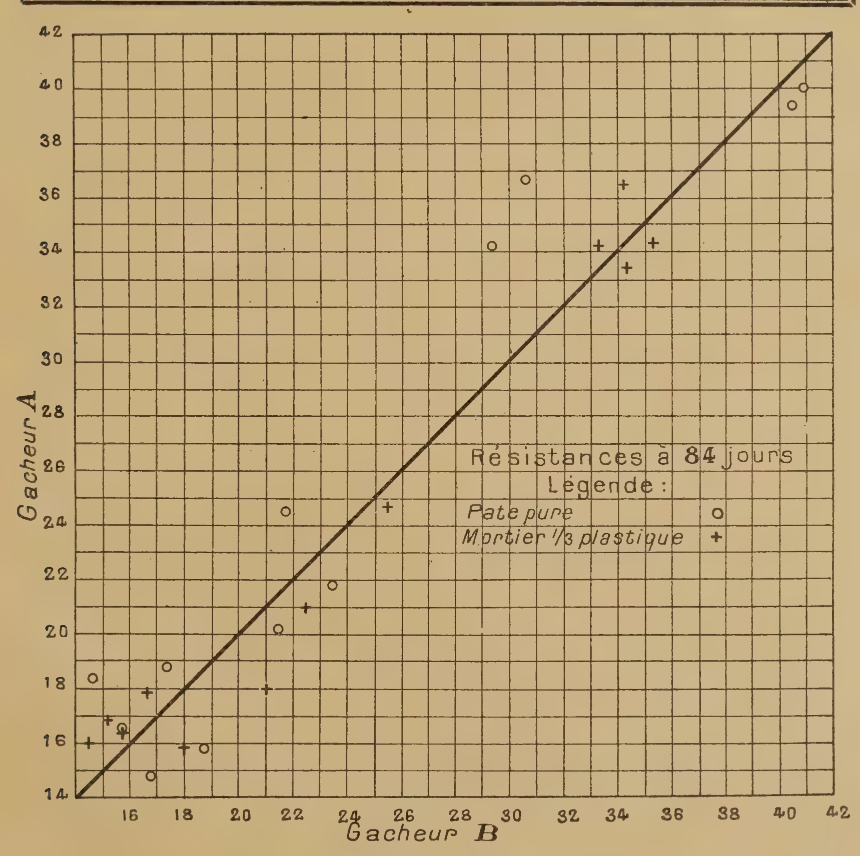
DÉSIGNATION des ÉCHANTILLONS	COMPARAISON DES RÉSISTANCES A L'ARRACHEMENT A 28 JOURS				ÉCARTS PAR RAPPORT A LA MOYENNE DES BRIQUETTES			
	Gâcheur A		Gâcheur B		Gâcheur A		Gâcheur B	
	pâte pure	mortier 1/3 plastique	pâte pure	mortier 1/3 plastique	pâte pure	mortier 1/3 plas.ique	pâte pure	mortier 1/3 plastique
	kg.	kg.	kg.	kg.	0/0	0/0	0/0	0/0
Ciment CE	31,66	22,91	29,33	22	7,39	13,48	12,51	10
Ciment CM	34,83	24,33	35,66	27,16	17,71	21,90	23,38	14,13
Ciment EB	17,16	17,16	16,50	18,50	22,38	7,70	15,15	18,91
Chaux OL	10	9,16	8,16	9.33	10	12,66	14,21	24,97
Chaux O¹L¹	8,83	8,33	8,50	8,66	13,25	32,05	17,64	19,16
Chaux O²L²	11,66	9,16	8	8,66	37,22	20	12,50	15,47
Moyennes					17,99	17,96	15,89	17,10



Graphique XI.

TABLEAU XLIX. — **Essais comparatifs entre les gâcheurs A et B.**
(Résistances à 84 jours.)

DÉSIGNATION des ÉCHANTILLONS	COMPARAISON DES RÉSISTANCES A L'ARRACHEMENT A 84 JOURS				ÉCARTS PAR RAPPORT A LA MOYENNE DES BRIQUETTES			
	Gâcheur A		Gâcheur B		Gâcheur A		Gâcheur B	
	pâte pure	mortier 1/3 plastique	pâte pure	mortier 1/3 plastique	pâte pure	mortier 1/3 plastique	pâte pure	mortier 1/3 plastique
	kg.	kg.	kg.	kg.	0/0	0/0	0/0	0/0
Ciment CE	36,66	34,16	41	33,33	17,29	9,25	12,19	25
Ciment CM	34,16	36,50	39,50	34,33	17,09	9,58	21,51	19,42
Ciment EB	24,50	16,83	21,83	24,66	14,28	10,54	19,10	18,89
Chaux OL	18,33	16,50	14,66	15,80	12,71	15,15	22,78	17,72
Chaux O¹L¹	18,83	17,83	20,25	21	22,14	34,50	11,11	19,04
Chaux O²L²	16,66	16	15,80	18	21,97	18,75	11,35	22,22
Moyennes					17,58	16,31	16,34	20,38



Graphique XII.

TABLEAU L. — **Essais de comparaison de gâchage entre les gâcheurs A et B.**

DÉSIGNATION des PRODUITS ESSAYÉS	DÉSIGNATION des GACHEURS	PROCÉDÉ	DENSITÉS	FINESSE à 4.900 MAILLES	EAU de GACHAGE	CYLINDRE	PRISE		RÉSISTANCE À LA TRACTION À 7 JOURS	
							DÉBUT	FIN	PATE PURE	MORTIER 1/3 plastique
				0/0	0/0	mm.	h.	h.	kg.	kg.
Ciment CB	A	LT	0,920	3,8	37	0	4	11,10	13,83	11
—	B	V	0,920	3,8	37	0	4	11,25	15,50	10
Ciment CG	A	LT	0,965	2,8	34	3	2,45	9,55	16,83	10
—	B	V	0,990	2,8	34	2	2,45	9,55	19,33	9,50
Ciment CM	A	LT	0,980	1	33	1	3,15	7,45	30	19
—	B	LT	0,980	1	33	1	3,25	8,05	31	18,66
Ciment CV	A	LT	1,103	18,3	25	1	2,40	4,40	31,33	14,16
—	B	LT	1,105	18	25	0	2,45	4,45	32,40	14,16
Ciment CDM	A	LT	1,055	21,4	30,5	45	1,15	2,15	12,75	7,25
—	B	LT	1,070	22,2	31,5	45	1,15	2,05	10,50	7
....	B	V	1,070	22,2	31,5	»	1,15	2,05	13,25	6
Ciment CM3	A	LT	0,985	31,5	27,5	10	0,20	0,45	14	5,33
—	B	LT	0,995	31,2	27,5	8	0,20	0,45	15	5,50
—	B	LT	0,995	31,2	27,5	»	0,20	0,45	14,25	5,25
Ciment C[1]V[1]	A	LT	1,120	20,2	25	1	3	4,45	26	12,75
—	B	LT	1,120	20,7	25	1	3	4,50	24,25	15,25
—	B	V	1,122	20,7	25	1	3	4,45	30,50	11,50

se compensent donc, dans un sens et dans l'autre, ce qui veut dire que les erreurs systématiques ont disparu et qu'il ne subsiste plus que les erreurs personnelles.

Nous avons renouvelé les essais précédents, 3° et 4°, avec un gâcheur de notre laboratoire et un gâcheur d'une autre usine de notre Société.

Nous donnons les résultats au tableau L.

En somme, le procédé V donne des résultats plus élevés en pâte pure que le procédé LT.

Lorsque les deux gâcheurs ont employé le même mode opératoire, ils ont obtenu une bonne concordance.

5° *Comparaison entre deux gâcheurs de notre laboratoire et les gâcheurs de divers laboratoires étrangers.*

J'ai complété mes recherches sur la comparaison des résultats des essais mécaniques, par une tournée de deux de mes gâcheurs dans plusieurs laboratoires officiels, où ils ont opéré sur les mêmes produits et simultanément avec les gâcheurs de ces laboratoires.

La quantité de documents ainsi réunis étant considérable, j'ai résumé dans les tableaux LI et LII les résultats de cette enquête.

Dans cette série d'essais, chaque gâcheur opérait d'après les prescriptions officielles, mais avec les légères variantes qu'imprime chaque individu à sa propre manière de suivre lesdites prescriptions.

Les écarts n'ont pas été plus faibles à la compression qu'à la traction.

Conclusions des essais comparatifs de gâchage.

Malgré la précision des prescriptions officielles, on voit que l'équation personnelle joue un rôle important dans les résultats des essais mécaniques des chaux et ciments.

Dans un même laboratoire, entre deux gâcheurs travaillant côte à côte et s'imitant, l'écart maximum entre les résultats s'élève à 10 0/0.

Mais, entre deux laboratoires différents, cet écart est couramment beaucoup plus élevé. Il peut atteindre jusqu'à 50 0/0 ; mais nous pensons d'après les résultats obtenus qu'il serait possible d'obtenir que cet écart ne dépasse 15 0/0.

Tableau LI. — **Essais comparatifs de gâchage.**

Résistances à la traction		Désignation des gâcheurs	Chaux hydraulique CLP 7 jours	Chaux hydraulique CLP 28 jours	Chaux hydraulique CLP 84 jours	Chaux AL 7 jours	Chaux AL 28 jours	Chaux AL 84 jours	Chaux ML 7 jours	Chaux ML 28 jours	Chaux ML 84 jours	Ciment CG 7 jours	Ciment CG 28 jours	Ciment CG 84 jours	Ciment M 7 jours	Ciment M 28 jours	Ciment M 84 jours	Ciment V 7 jours	Ciment V 28 jours	Ciment V 84 jours	Ciment P 7 jours	Ciment P 28 jours
Matière pure	SPL	Gâcheur A	12,17	13,9	4,56	15,76	10,89	5,61	6,32	5,73	5,72	8,64	5,16	1,60	11,70	6,28	3,12	5,59	2,75	4,66	3,88	2,21
		— B	13,69	12,6	11,64	20,40	11,63	9,31	5,25	5,98	9,05	9,55	3,55	4,09	8,72	11,68	6,77	10,20	4,65	3,49	0,24	8,35
	PCB	— C......	10,86	2	0,54	17,31	6,09	5,47	7,46	3,36	2,73	11,90	9,59	13,14	5,39	2,10	3,89	2,69	1,94	7,25	»	»
		— D	6,52	3	5,76	7,26	0,32	5,94	11,27	5,09	6,06	0,88	2,95	0,80	1,51	6,19	4,85	4,88	1,94	1,43	»	»
		— GB	0	29	4,39	19,01	2,08	1,07	0,60	8,01	0,88	0,3	6,56	0,34	1,07	15,45	2,41	0,33	1,01	2,77	»	»
		— PCP ..	0	4	»	17,46	13,96	»	11,57	0,39	»	1,66	9,25	»	4,53	9,46	»	10,43	5,39	»	2,98	6,08
		— AM....	8,47	17,6	21,59	16,69	23,43	19,37	4,11	7,31	19,36	0,94	5,84	10,88	6,60	15,95	13,89	2,92	9,11	5,84	»	»
Mortier 1:3 plastique	L	Gâcheur A	3,24	3,54	6,01	14,05	4,90	7,82	3,87	5,52	3,08	0,80	2,51	4,48	4,30	2,92	2,63	11,02	8,03	10,37	10,67	7,50
		— B	9,38	8,09	5,83	14,25	15,88	5,87	9,53	2,97	6,61	1,51	1,51	6,74	5,82	4,49	6,52	9,23	9,77	3,06	4,46	3,47
	PCB	— C	11,51	3,87	9,06	13,65	8,31	3,91	1,68	2,97	11,96	7,88	4,16	8,63	5,48	0,32	3,15	12,82	8,26	4,76	»	»
		— D	13,25	1,18	8,61	9,63	7,25	7,47	11,20	12,28	13,59	2,06	8,07	1,32	6,17	7,09	0,35	12,82	15,25	4,36	»	»
		— GB	17,32	3,87	8,61	36,54	20,46	20,99	10,22	5,70	12,25	4,65	3,29	12,95	2,84	1,99	4,91	1,54	14,66	3,78	»	»
		— PCP...	8,30	9,62	»	9,63	5,54	»	4,66	7,56	»	19,8	4,51	»	6,31	0,78	»	13,67	3,37	»	15,38	4,26
		— AM ...	15,16	2,52	5,47	17,26	17,59	11,50	19,56	0,24	18,38	6,91	4,12	1,26	0,55	0,23	5,26	4,44	1,39	1,09	»	»

Écart moyen de chacun des gâcheurs par rapport à la moyenne obtenue.

Tableau LII. — **Essais comparatifs de gâchage.**

Désignation des gâcheurs			Moyenne générale des écarts 0/0 obtenus par chacun des gâcheurs — Par rapport à la moyenne obtenue par les gâcheurs A et B	Par rapport à la moyenne obtenue par l'ensemble des gâcheurs
			0/0	0/0
Résistances à la traction	Matière pure	S. P. L. gâcheur A	6,72	6,81
		S. P. L. gâcheur B	8,28	8,51
		P. C. B. gâcheur C	7,72	6,31
		P. C. B. gâcheur D	4,88	4,25
		Gâcheur GB	6,73	5,29
		Gâcheur PCP	6,67	6,94
		Gâcheur AM	12,99	11,71
	Mortier 1/3 plastique	S. P. L. gâcheur A	5,40	5,86
		S. P. L. gâcheur B	6,77	6,76
		P. C. B. gâcheur C	6,70	6,41
		P. C. B. gâcheur D	8,27	7,88
		Gâcheur GB	10,89	10,36
		Gâcheur PCP	8,66	8,10
		Gâcheur AM	7,34	7,38

§ 3. — RECHERCHES DE MÉTHODES NOUVELLES

J'ai fait quelques tentatives pour arriver à établir des méthodes nouvelles plus précises.

J'ai cherché tout d'abord à appliquer à la mesure de la prise et du durcissement la méthode de la bille de Brinell, qui rend de si grands services dans la métallurgie et dont M. Laborde avait fait quelques tentatives d'adaptation aux liants hydrauliques.

J'ai envisagé ensuite les essais à la compression dont les Allemands apprécient beaucoup la concordance.

Je vais résumer rapidement les résultats de ces deux tentatives.

I. — Méthode de la bille de Brinell.

I. — Après divers tâtonnements, on a adopté, comme éprouvettes les plus commodes, les cubes réglementaires de 50 centimètres carrés de surface. On a opéré sur quelques cubes de pâte pure et surtout sur des cubes en mortier normal 1/3, conservés vingt-

quatre heures à l'air humide, puis ensuite immergés à l'eau douce.

Ayant trouvé quelques difficultés à mesurer sur des cubes de mortier, soit la profondeur, soit le diamètre de l'empreinte, nous avons finalement adopté le dispositif suivant, où la pression est opérée au moyen de la machine Michaelis légèrement modifiée.

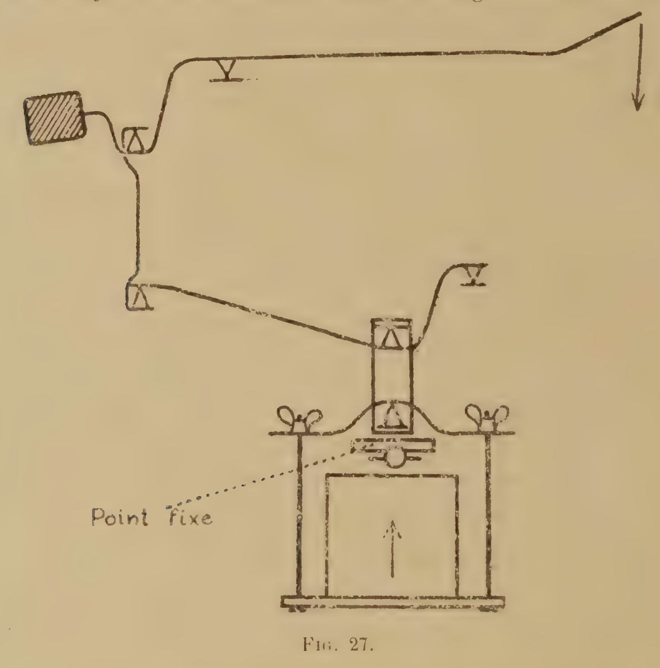


Fig. 27.

Le croquis (*fig.* 27) et la photographie (*fig.* 28) rendent compte de l'installation.

A la place de la griffe mobile de la machine on accroche un étrier sur lequel repose le cube. Quand on verse les plombs dans le seau le cube vient se presser contre une barre solidement fixée à la table qui porte la machine et qui porte en saillie une bille d'acier de 25^{mm},4. La figure 29 donne la disposition adoptée pour fixer la bille.

On opère la prise de contact avec le poids du seau, puis on laisse couler d'un réservoir Michaelis une quantité de plomb déterminée, correspondant à une pression totale sur la bille de 50, de 100 ou de 200 kilogrammes, etc.

Une règle graduée est installée à l'extrémité du levier de la

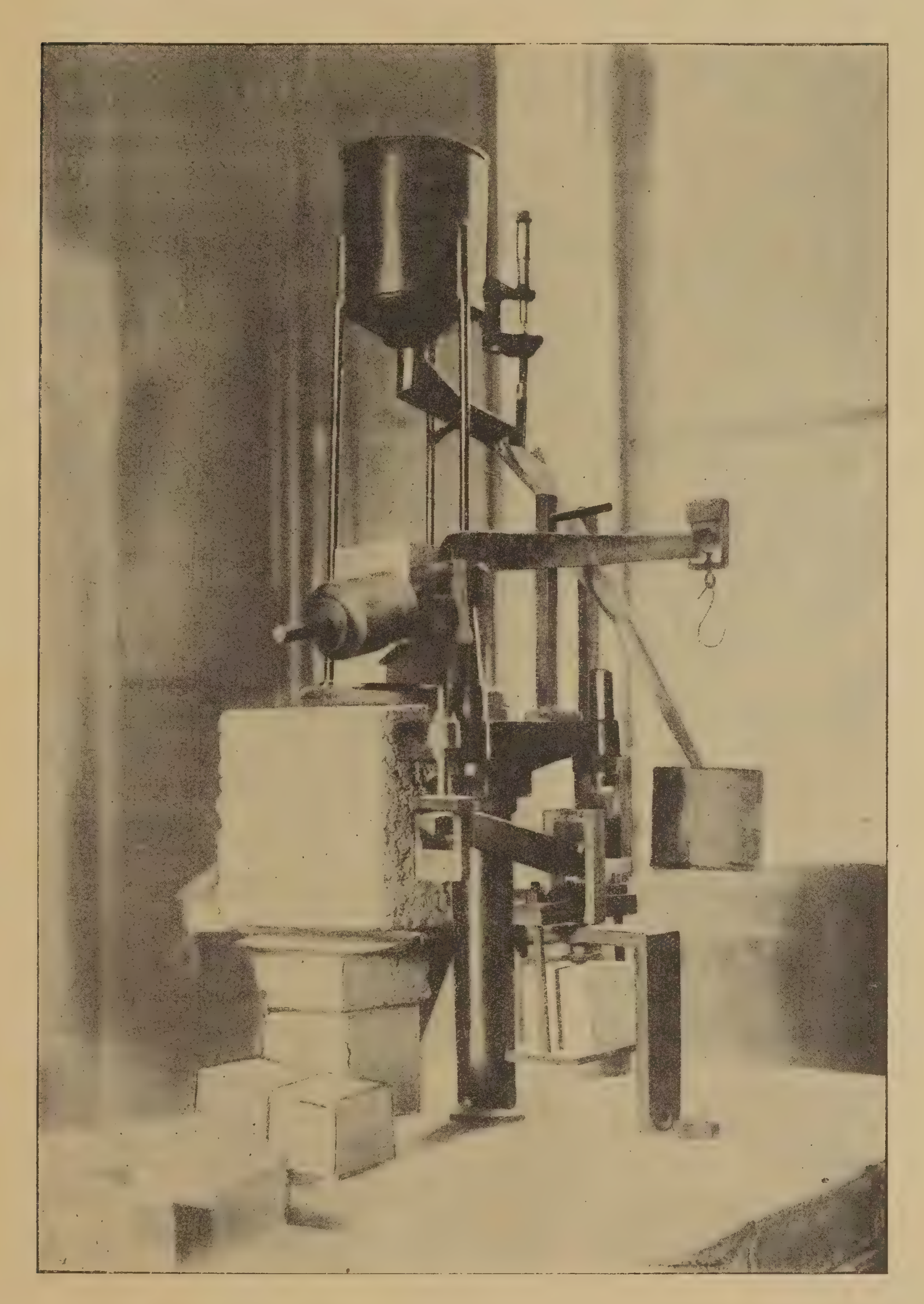


Fig. 28.

machine Michaelis et on lit très facilement à 1 millimètre près la distance parcourue par l'extrémité du levier, pendant sa descente, distance qui représente alors 50 fois la profondeur de l'empreinte.

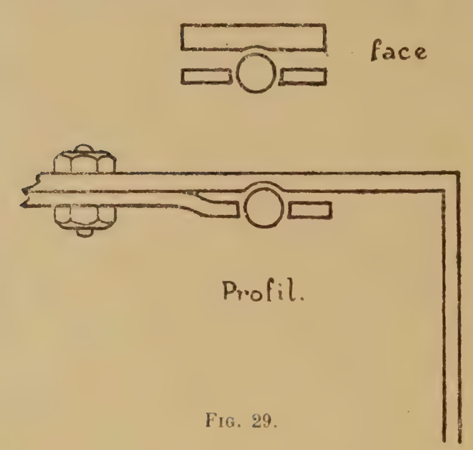
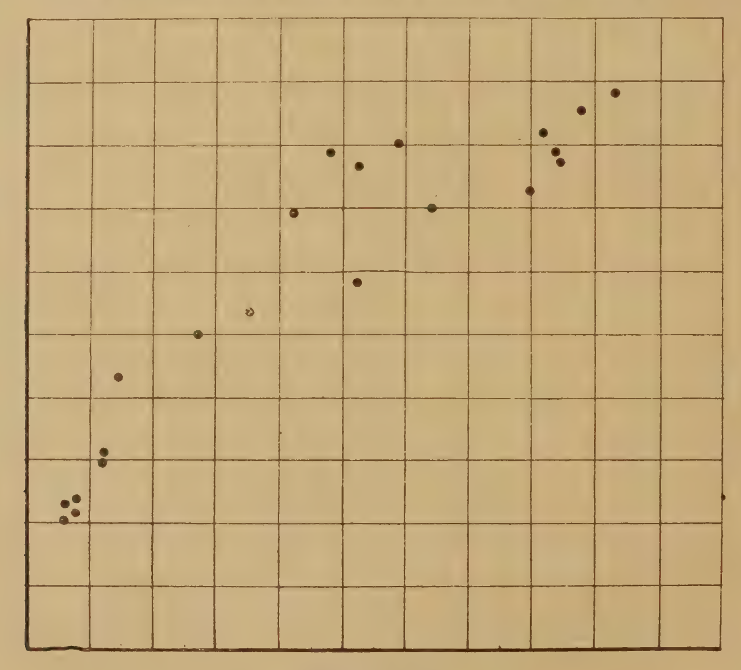


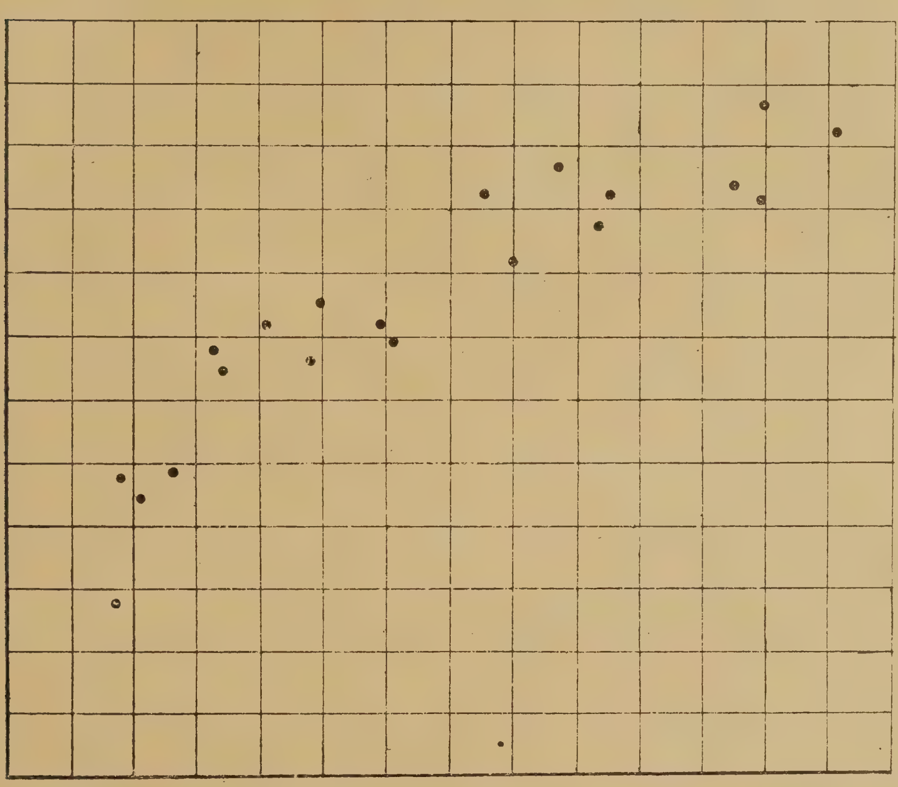
Fig. 29.

Cet enfoncement n'est pas toujours continu ; il se produit quelquefois par saccades. Il y a des chutes brusques du levier qui proviennent évidemment de vides existant à l'intérieur du cube ou d'écroulement de grains de sable sur le bord de l'empreinte.

II. — On a tout d'abord constaté que sur les six faces d'un cube de mortier — gâché normalement — la face supérieure donnait toujours les moindres enfoncements et la face inférieure les plus forts.


Graphique XIII.

Aussi n'a-t-on tenu compte, pour se renseigner sur la valeur de la méthode, que des empreintes sur les quatre faces latérales. On faisait sur chacune d'elles trois ou souvent cinq empreintes; la moyenne des douze ou vingt empreintes ainsi obtenue donnait une profondeur h dont l'inverse multiplié par $\frac{P}{2\pi r}$ (P, pression exercée



Graphique XIV.

sur le levier; r, rayon de la bille) représentait le nombre de dureté caractéristique du cube.

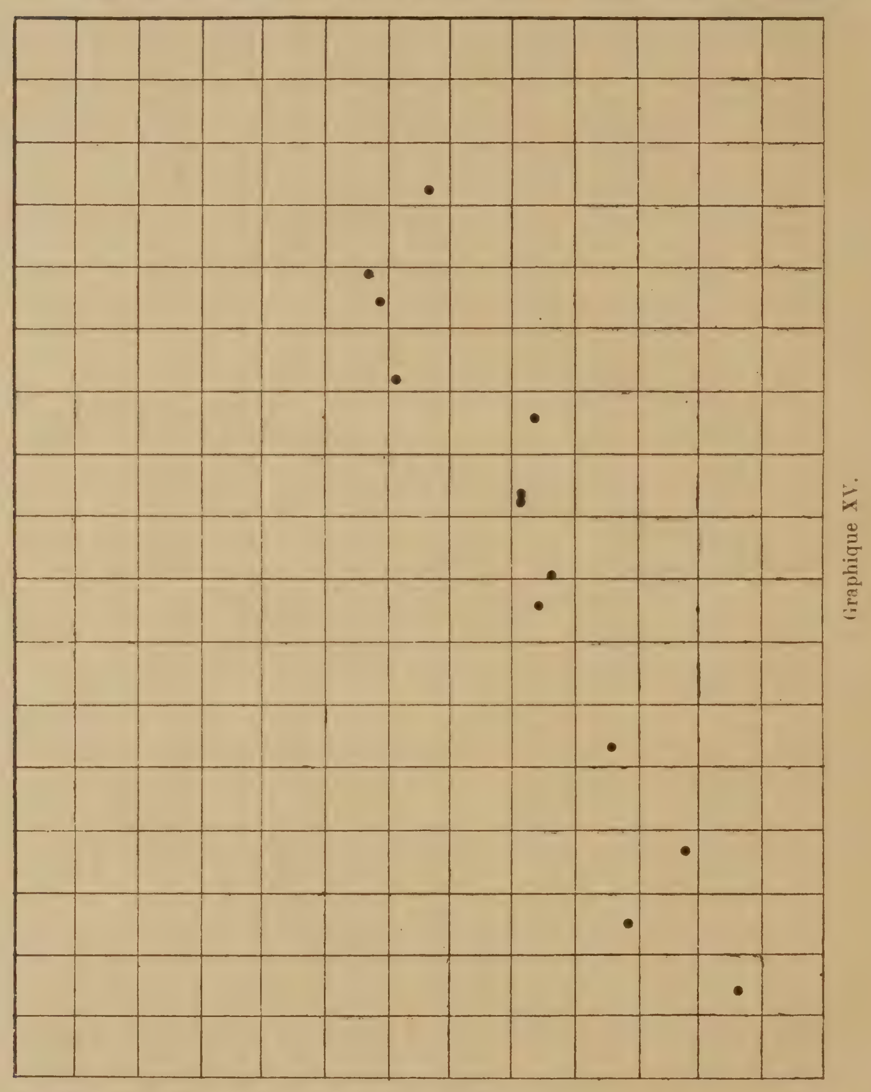
Comme on opérait sur des séries de trois cubes, chaque nombre de dureté représentait la moyenne de 36 à 60 nombres différents.

Chacun des cubes ainsi essayés était porté à la machine Amsler-Lafon et écrasé. On obtenait de cette façon un chiffre de résistance à la compression représentant la moyenne des chiffres d'écrasement des trois cubes de la série.

Nous avons réuni les résultats obtenus dans les graphiques sui-

vants où les résistances en kilogrammes à l'écrasement sont portées sur l'axe des x et les nombres de dureté sur l'axe des y.

Les graphiques XIII, XIV, XV donnent le rapport des nombres

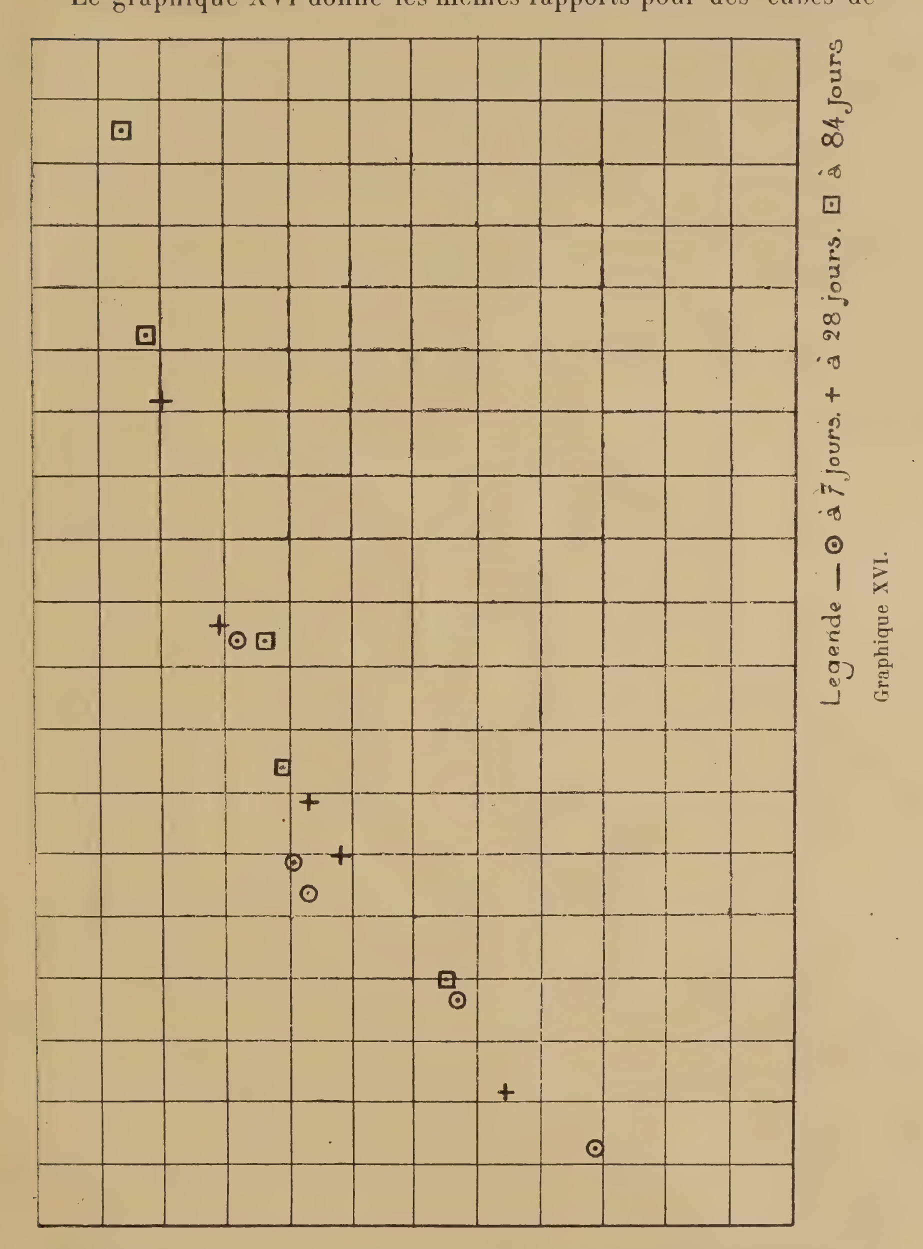


Graphique XV.

de dureté et des résistances à la compression pour des cubes faits avec différents liants, mais de même âge :

Pour le graphique XIII	....	7 jours
— XIV	....	28 —
— XV	....	84 —

Le graphique XVI donne les mêmes rapports pour des cubes de



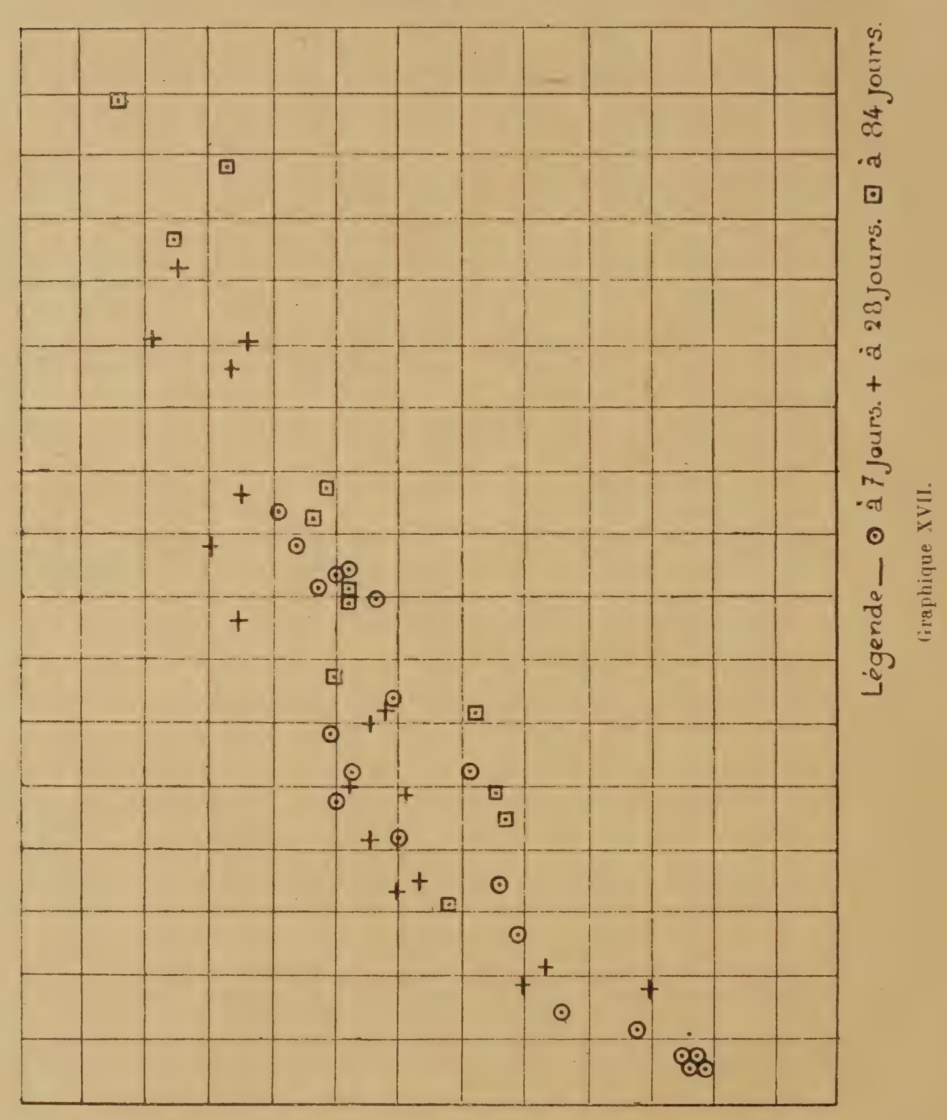
Graphique XVI.

différents liants et de différents âges, mais essayés à chaque âge différent sous la même pression.

Enfin le graphique XVII donne les mêmes rapports pour des

cubes de différents liants à différents âges et essayés sous des pressions différentes.

Si on laisse de côté le graphique XV (même liant à 84 jours), où



Graphique XVII.

les points représentatifs ont l'air de se grouper suivant une droite, l'examen des graphiques XIII, XIV, XVI, XVII montre que les points représentatifs se groupent sensiblement suivant des paraboles tangentes à l'origine à l'axe des y.

Il en résulte que les nombres de dureté croissent seulement comme la racine carrée des résistances à la compression et que la méthode essayée offre d'autant moins de précision que l'âge des cubes est plus grand.

Aussi n'y a-t-il pas lieu de s'attarder à constater que les écarts maxima des diverses mesures, par rapport à la moyenne, sont moindres que dans les essais normaux et d'autant moindres que l'âge des cubes est plus avancé ; cela tient simplement à ce que la méthode est moins précise et il nous apparaît définitivement qu'il n'y a pas lieu de poursuivre d'autres essais dans cette voie.

Nous avons cependant, au cours de ces études, rencontré quelques résultats qui méritent d'être notés.

III. — Nous avons dit incidemment plus haut que dans les essais en mortier la face supérieure était notablement la plus dure et la face inférieure la moins dure des six faces du cube.

Exemples. — 1° Cubes en mortier ordinaire de chaux B :

Pression	50 kg.
Face inférieure. Enfoncement..................	45 mm.
— supérieure. —	36 mm.

2° Cubes en mortier ordinaire d'une autre chaux :

Pression	50 kg.
Face inférieure. Enfoncement..................	45 mm.
— supérieure. —	33 mm.

Lorsqu'on fait trois empreintes sur une face latérale, on trouve toujours que l'empreinte 1 située près de la face supérieure, la plus dure, est moins forte que l'empreinte 3 située près de la face inférieure la moins dure. Le cube est donc moins dur en 1 qu'en 3.

EXEMPLES

	Empreinte 1	Empreinte 3
	—	—
Cube n° 1............................	42 mm.	37 mm.
Cube n° 2............................	45 —	40 —
Cube n° 3............................	41 —	37 —

Ces résultats se retrouvent sur les quatre faces.

Si l'on fait d'autre part la moyenne des empreintes prises sur chacune des quatre faces, on trouve généralement deux groupes de deux faces de dureté voisine et également distantes de la dureté moyenne.

EXEMPLES

1. — Cubes en mortier ordinaire de chaux. — Pression, 50 kilogrammes.

Faces latérales........................	50 mm.	52 mm.
	47 —	47 —

2. — Cubes en mortier ordinaire de chaux M. — Pression, 100 kilogrammes.

Faces latérales........................	49 mm.	51 mm.
	42 —	42 —

Il n'a pas été possible de déceler la cause de cette différence qui nous a apparu comme systématique. Cependant nous avons eu parfois des résultats très concordants :

EXEMPLES

3. — Cubes en mortier ordinaire de ciment B. — Pression, 200 kilogrammes.

Faces latérales........................	71 mm.	70 mm.
	71 —	72 —

Ces anomalies ne se trouvent pas dans l'essai sur des cubes pâte pure. Là comme le montre le tableau suivant, les empreintes sont du même ordre sur toutes les faces, qui présentent par conséquent la même dureté.

	Faces inférieures	Faces supérieures	Faces latérales	
	—	—		
Premier exemple....	37,8 mm.	37 mm.	36,6 mm.	36,9 mm.
			36,4 —	36,8 —
Deuxième exemple...	63,4 —	63,6 —	60 —	64,1 —
			61 —	63,4 —
Troisième exemple...	50,8 —	55,4 —	52,2 —	52 —
			52,6 —	51,8 —

Mais avec les pâtes pures la précision de la méthode paraît moindre encore qu'avec les mortiers, car les nombres de dureté — peu nombreux d'ailleurs — que nous avons paraissent croître moins rapidement que la racine carrée des résistances à l'écrasement.

La différence de dureté constatée entre les faces supérieures et inférieures et les faces latérales des cubes en mortier, nous ayant — par suite de ce qui précède — apparu comme la conséquence du procédé de gâchage qui devait faire refluer le ciment à la partie supérieure des cubes, nous avons essayé si une autre méthode de fabrication des éprouvettes ne ferait pas disparaître ces différences.

Nous y sommes en effet parvenus au moyen de l'artifice suivant : nous avons fait remplir les moules en projetant à l'intérieur le mortier en deux ou trois fois et d'une façon vigoureuse — un peu

à la manière dont les briquetiers opèrent pour fabriquer les pièces réfractaires, — puis enfoncer et retirer de nombreuses fois et en suivant les parois du moule, une pointe longue et mince, un clou ou un gros fil de fer.

Par ce procédé, comme le montrent les chiffres ci-dessous, l'homogénéité des six faces est obtenue.

Face inférieure	Face supérieure	Faces latérales	
—	—		
33,6 mm.	35,3 mm.	33,1 mm.	34,7 mm.
		32,4 —	32,6 —

Malheureusement cela ne donnait pas de précision à la méthode qui reste défectueuse pour les raisons que nous avons données plus haut.

J'entrepris alors de nouveaux essais dans le but de rechercher un procédé de mesure du durcissement initial des produits hydrauliques pouvant se substituer à l'essai actuel de prise par l'aiguille Vicat.

Au lieu d'opérer sur le mortier, j'ai, dans ces essais nouveaux, opéré sur des pâtes pures enfermées dans un bac normal de prise.

La bille avait 30 millimètres de diamètre.

La pression exercée sur le ciment par l'intermédiaire de la bille a toujours été uniformément de 50 kilogrammes.

Cet effort était produit par la chute dans un seau suspendu à l'extrémité du grand bras d'un levier 1-10 de 5 kilogrammes de grenaille de plomb, la prise de contact étant faite préalablement par le poids même du seau.

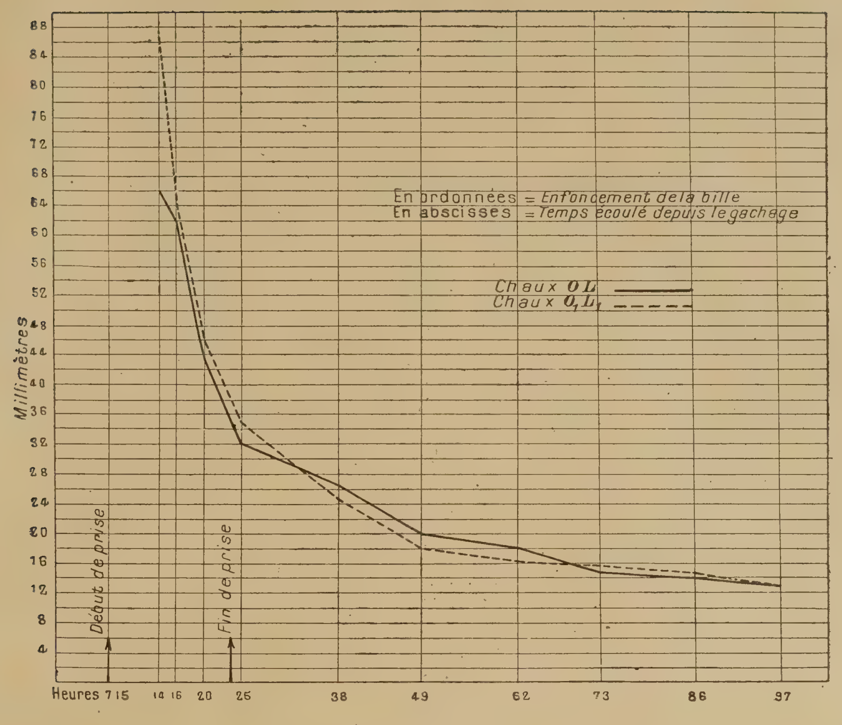
Comme dans les précédentes expériences, la profondeur de l'empreinte était mesurée par le déplacement de l'extrémité du levier devant une échelle graduée ; les chiffres marqués aux tableaux suivants sont donc décuples de la profondeur de l'empreinte, et la précision est cinq fois moindre que dans mes premières expériences. Cependant, la lecture se faisait normalement sur l'échelle à 1/2 millimètre près, on apprécie donc la profondeur de l'empreinte à 1/20 de millimètre.

Les résultats sont résumés dans les tableaux LIV et LV et les graphiques XVIII et XIX.

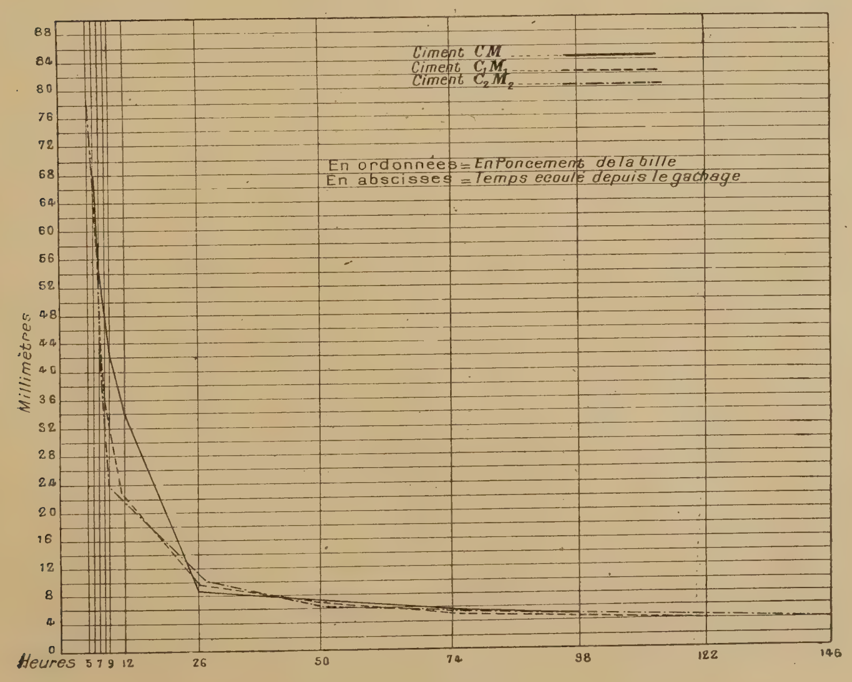
Les graphiques ont été tracés avec la moyenne de trois essais faits sur trois bacs contenant un même produit, mais provenant du

TABLEAU LIV.

DÉSIGNATION DU PRODUIT	DATES des OPÉRATIONS	TEMPS écoulé depuis le gâchage	ENFONCEMENT DES EMPREINTES 1re SÉRIE 1er gâcheur	2e SÉRIE 2e gâcheur	3e SÉRIE 3e gâcheur	MOYENNES	PLUS GRAND ÉCART par rapport à la moyenne	PLUS GRAND ÉCART exprimé en 0/0
		h.	mm.	mm.	mm	mm.	mm.	0/0
Chaux OL …. Prise …… Début …. 7 h. 15.	10 sept.	14	67	66	65	66	1	1,51
Chaux OL …. Prise …… Fin …… 24 h. …	10 —	16	63	62	61	62	1	1,61
	10 —	20	46	42	42	43,3	2,7	6,23
	10 —	25	33	33	30	32	2	6,25
	11 —	38	28	26	25	26,3	1,7	6,45
	11 —	49	20	20	20	20	0	0
Chaux OL …. Heure du gâchage. Pâte pure. 17 h. …	12 —	62	18	18	18	18	0	0
	12 —	73	15	15	15	15	0	0
	13 —	86	14	14	14	14	0	0
	13 —	97	13	13	13	13	0	0
Chaux O^1L^1 … Prise …… Début …. 7 h. …	4 sept.	14	79	80	101	86,6	14,1	16,6
Chaux O^1L^1 … Prise …… Fin …… 24 h. …	4 —	16	56	60,5	77,5	64,6	12,9	19,9
	4 —	20	46,5	48	44	46,1	2,1	4,5
	4 —	25	36	35	34,5	35,1	0,9	2,5
	5 —	38	26,5	25	23	24,8	1,8	7,2
	5 —	49	18,5	18	17	17,8	0,8	4,4
Chaux O^1L^1 … Heure du gâchage. Pâte pure. 17 h. …	6 —	62	16	16,5	16,5	16,3	0,3	1,8
	6 —	73	15,6	16	16	15,8	0,3	1,8
	7 —	86	15	15	15	15	0	0
	7 —	97	13	13	13	13	0	0



Graphique XVIII.



Graphique XIX.

TABLEAU LV.

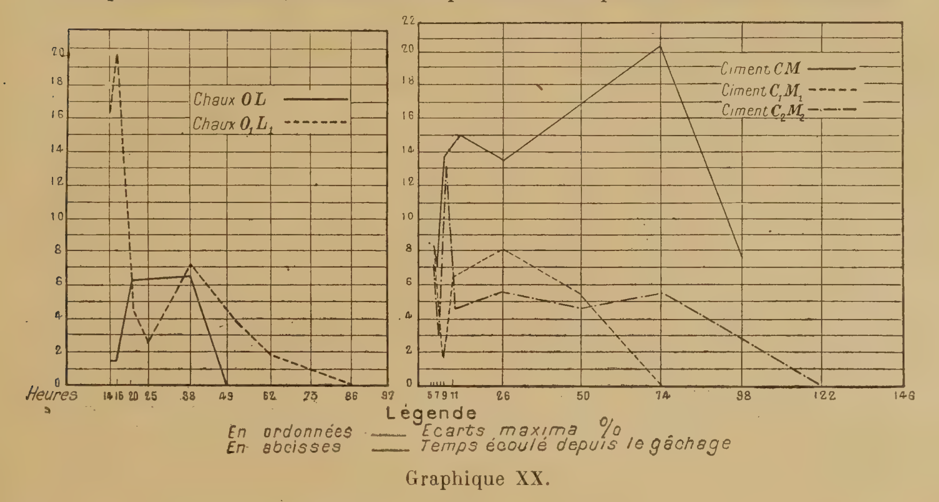
DÉSIGNATION DU PRODUIT			DATES des OPÉRATIONS	TEMPS écoulé depuis le gâchage	ENFONCEMENT DES EMPREINTES 1re SÉRIE 1er gâcheur	2e SÉRIE 2e gâcheur	3e SÉRIE 3e gâcheur	MOYENNES	PLUS GRAND ÉCART par rapport à la moyenne	PLUS GRAND ÉCART exprimé en 0/0
				h.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	0/0
Ciment CM....			13 août	6	64	70,5	75	69,8	5,8	8,3
	Prise...... Début....	2 h. 15..	13 —	7	50,5	55	59	54,8	4,3	7
	Fin......	9 h. 25..	13 —	9	46,5	44	36,5	42,3	5,8	13,7
			13 —	12	38,5	37,5	30	35,3	5,3	15
	Heure du gâchage. Pâte pure.	5 h.....	14 —	26	10	8,5	8	8,8	1,2	13,6
			16 —	74	7	5	5,5	5,8	1,2	20,5
			17 —	98	5	5	5,5	5,1	0,4	7,8
Ciment C^1M^1..			21 août	5	73	82	83	79,3	6,3	7,9
	Prise...... Début....	2 h. 20..	21 —	6	61	68	70	66,3	5,3	7,9
	Fin......	9 h. 40..	21 —	8	36	36	35	35,6	0,6	1,6
			21 —	11	22,5	22	24,5	23	1,5	6,5
			22 —	26	10,5	10	9	9,8	0,8	8,1
	Heure du gâchage. Pâte pure.	5 h.....	23 —	50	7,5	7	7	7,1	0,4	5,6
			24 —	74	5	5	5	5	0	0
			26 —	122	4	4	4	4	0	0
Ciment C^2M^2..			28 août	6 15	80	74	70	74,6	5,4	7,2
	Prise...... Début....	4 h.....	28 —	7 15	44	55	39	46	9	2,9
	Fin......	9 h. 10.	28 —	9 15	23	27	21,5	23,8	3,2	13,4
			28 —	12 15	22	21	20	21	1	4,7
			29 —	26 15	11	10	11	10,6	0,6	5,6
			30 —	50 15	6,5	6	6,5	6,3	0,3	4,7
	Heure du gâchage. Pâte pure.	5 h.....	31 —	74 15	5,5	5	5,5	5,3	0,3	5,6
			2 sept.	122 15	5	5	5	5	0	0
			3 —	146 15	4	4	4	4	0	0

gâchage de trois gâcheurs ou de trois gâchages différents d'un même gâcheur.

Sur un bac spécial on mesurait la prise par la méthode ordinaire.

Les essais ont porté sur trois ciments : CM, C_1M_1, C_2M_2, et sur deux chaux : OL, O_1L_1.

Ils ont commencé entre le début et la fin de prise. On a cherché, un peu au hasard, à avoir une première empreinte de 8 millimètres



Graphique XX.

de profondeur (80 millimètres de lecture), empreinte au-dessus de laquelle la précision paraît insuffisante.

Les graphiques XVIII et XIX montrent que la courbe de la profondeur d'empreinte, par rapport au temps, se présente comme asymptote à l'axe des X et représente assez bien une branche d'hyperbole équilatère.

On a calculé en outre et reporté sur le graphique XX le plus grand écart pour 100 par rapport à la moyenne sur les trois essais faits sur un même produit.

Les lectures ne se faisant qu'au demi-millimètre près, ces écarts s'annulent forcément quand la dureté du ciment est devenue suffisante.

Il y a lieu d'ailleurs de remarquer que le nombre de dureté qui, pour une même grosseur de bille et une même charge de levier, est proportionnel à l'enfoncement de la bille, augmente beaucoup moins vite que la résistance à la compression.

La loi qui lie ces deux phénomènes paraît être parabolique.

Cette même loi apparaît ici et semble d'une grande importance, car le nombre de dureté a l'air de tendre vers une constante, alors que certainement la résistance à la compression augmente toujours.

Il semble que, au lieu de déterminer la fin de la prise par une profondeur d'empreinte déterminée, toujours aléatoire, on pourrait dire : « La prise sera considérée comme terminée quand deux essais consécutifs, séparés de X heures, donneront une différence de profondeur d'empreinte inférieure à tant de millimètres. »

Si, par exemple, le cahier des charges indique une prise terminée en moins de 10 heures, l'essai à la bille fait à 10 heures et à 15 heures du gâchage devra donner une différence de profondeur d'empreinte moindre qu'une quantité déterminée.

II. — **Essais à l'écrasement.**

Comme nous l'avons dit, les Allemands accordent leurs préférences aux essais de résistance à l'écrasement et il faut bien reconnaître que le ciment travaillant presque exclusivement en compression, il semble logique de donner plus d'importance à la connaissance de la résistance à l'écrasement qu'à celle de la résistance à la traction.

Nous avons comparé les deux méthodes d'essais. Pour les essais à la compression nous avons opéré sur des cubes de 50 centimètres carrés de surface; les essais d'écrasement sur les demi-briquettes ayant servi à l'essai d'arrachement nous paraissent donner des résultats trop différents d'une éprouvette à l'autre pour un même ciment.

Nous retrouvons avec les essais à la compression les mêmes erreurs provenant du facteur personnel : le gâcheur ; mais l'écart moyen 0/0 des résultats par rapport à la moyenne reste du même ordre, de 10 0/0 à 15 0/0.

Ils paraissent cependant devoir retenir l'attention par la régularité des résultats trouvés. Les essais à la traction présentent des anomalies, et alors que d'après eux il semblerait qu'à certaines périodes la résistance d'un ciment baisse, les essais à la compression, eux, montrent qu'il n'en est rien et que le liant continue à augmenter de résistance (tableau LVI).

Les nombreux essais, que nous avons faits sur les ciments alu-

TABLEAU LVI.

		Résistances à la traction				Résistances à la compression			
		7 jours	28 jours	84 jours	3 mois	7 jours	28 jours	84 jours	3 mois
Ciment A	pâte pure....	39,2	36,0	42,2	46,3	300	520	537	662
	mortier 1/3 plastique.	18,3	26,5	28,7	28,7	65	130	220	285
Ciment	pâte pure....	30,7	38,9	37,0		350	597	713	
	mortier 1/3 plastique.	18,8	22,0	27,1		35	135	212	
Ciment	pâte pure....	45,0	57,0	52,0		512	697	790	
	mortier 1/3 plastique.	29,0	39,0	39,1		232	395	415	
Ciment D	pâte pure....	non essayé				»			
	mortier 1/3 plastique.	18,7	32,1	29,6		107	175	185	

mineux et dont nous parlerons au chapitre suivant qui traite de ces nouveaux liants, montrent encore plus clairement que les résistances à l'écrasement sont beaucoup plus constantes à la compression qu'à la traction.

La substitution des essais de compression à ceux de traction semble donc devoir s'imposer. Si l'on tient essentiellement à essayer les éprouvettes à des efforts de traction, il convient, avec les corps isotropes, d'employer la rupture à la flexion plutôt que la rupture directe à la traction.

CHAPITRE VII

CIMENT ALUMINEUX

CHAPITRE VII

CIMENT ALUMINEUX

C'est en recherchant un produit indécomposable à l'eau de mer ou en présence des eaux chargées de sulfate de chaux que nous avons été amenés à découvrir les ciments alumineux dont la fabrication industrielle augmente de jour en jour d'importance.

Nous avons déjà indiqué au chapitre III l'influence néfaste des sulfates de chaux et de magnésie sur les ciments artificiels, mais c'est au début du XXe siècle seulement que l'urgence de la recherche d'un liant qui pût résister aux eaux sulfatées attira l'attention des ingénieurs.

Sur les conseils de M. H. Le Chatelier nous recherchâmes alors, dans les ouvrages du célèbre ingénieur Vicat, les travaux qu'il avait faits sur l'argile déshydratée et qui nous amenèrent à la fabrication, sous le nom de ciment indécomposable, d'un ciment rouge à l'argile déshydratée. A la même époque, M. Feret étudiait la gaize, matière pouzzolanique ; de là est sorti le ciment à la gaize de la Société des Ciments français. Des essais d'attaque à l'eau de mer, faits à la pointe de Grave ont montré que ces deux ciments résistaient bien à l'action de ladite eau. Mais les ciments pouzzolaniques ont un inconvénient. Pour obtenir la combinaison de la silice et de l'alumine avec la chaux, il faut la présence de l'humidité et dans le Sud Algérien, en particulier, ces ciments durcissaient difficilement.

Je poussai mes études d'un autre côté, suivant les principes de Vicat qui avait déclaré que, si l'on pouvait réaliser un ciment dont l'indice, c'est-à-dire le rapport : $\frac{\text{silice} + \text{alumine}}{\text{chaux} + \text{magnésie}}$ serait supérieur à 1, on aurait un ciment indécomposable.

Il était impossible d'obtenir un tel ciment en augmentant la teneur en silice. En effet des trois silicates : SiO^2CaO, $SiO^2,2CaO$, $SiO^2,3CaO$, les deux premiers ne sont pas hydrauliques. Le silicate monocalcique est toujours inerte ; quant au silicate bicalcique, il semble bien, quoique la question soit encore légèrement controversée, qu'aucune de ses trois formes stables entre 0° et 600°, 600° et 1.400° et au-dessus de 1.400°, n'ait de propriété hydraulique importante.

J'ai donc cherché à augmenter la teneur en alumine et suis ainsi arrivé en 1908 à la découverte des ciments alumineux que l'on peut définir ainsi :

Ciment dans lequel le poids d'alumine est nettement supérieur au poids de silice.

Leur analyse varie entre des limites plus étendues que pour le portland artificiel : on peut les résumer dans le tableau suivant :

SiO^2	5 0/0	10 0/0	15 0/0
Al^2O^3	45 —	40 —	35 —
Fe^2O^3	15 —	10 —	15 —
CaO	35 —	40 —	35 —

Il faut ajouter que le fer qui est indiqué dans l'analyse sous la forme de Fe^2O^3 est le plus souvent et presque en totalité contenu dans le ciment alumineux, soit sous forme de fer métallique, soit sous forme de fer réduit à l'état de FeO ou de Fe^3O^4.

En même temps que nous, l'Américain Spackman avait étudié aux États-Unis les produits alumineux, mais il n'avait guère fait que des expériences de laboratoire et considérait ces produits comme devant constituer des additions qui en mélange avec du ciment naturel, de la chaux grasse ou même du plâtre, devait donner des produits ayant des qualités nouvelles de résistance. Ses travaux ont été résumés dans un article de l'*Engineering News Record* de mai 1922.

I. — Constitution intime du ciment alumineux.

Les aluminates de chaux connus sont au nombre de quatre :

$5Al^2O^3,3CaO$; Al^2O^3,CaO ; $3Al^2O^3,5CaO$; $Al^2O^3,3CaO$;

qui peuvent être assimilés à des aluminates demi-calcique, monocalcique, bicalcique et tricalcique. Les deux premiers répondent à

la demande de Vicat, c'est-à-dire sont indécomposables à l'eau de mer et possèdent en outre les propriétés particulières qui en font des ciments d'un grand intérêt. Le bicalcique et le tricalcique ont des prises instantanées et ne correspondent plus aux exigences d'indécomposabilité, leur rapport :

$$\frac{SiO^2 + Al^2O^3}{CaO + MgO} \text{ devenant } < 1.$$

Ces quatre aluminates ont été, depuis la découverte des ciments alumineux, fabriqués et préparés à l'état de pureté par M. Bates, chimiste du Bureau of Standards à Washington qui a publié en septembre 1921 les résultats de ses études. Ils concordent avec ceux que nous avons obtenus nous-même tant au Laboratoire de la Société Pavin de Lafarge qu'à celui du Bureau d'Organisation Économique.

M. Bates a fait ses expériences sur des clinkers d'un four rotatif de laboratoire ; nous nous avons été amené à obtenir le liant par fusion, parce que les aluminates n'ont pas de palier de ramollissement et que leur clinkerisation est difficile industriellement.

Mais le mode de fabrication a peu d'influence sur les qualités hydrauliques du liant ; les conclusions de M. Bates sont en effet comme nous venons de le dire et sauf sur un point, dont nous parlerons plus loin, conformes aux nôtres.

Il reconnaît en particulier que seuls les aluminates demi-calcique et monocalcique peuvent être aptes à donner du ciment, leur prise étant lente et leur durcissement rapide.

Quant aux impuretés, il a étudié plus spécialement la silice. Parmi les ciments qu'il a ainsi obtenus, quelques-uns, si on met à part la teneur en fer, ont des analyses semblables à celles des ciments obtenus en France. Ces ciments, dont voici l'analyse, sont portés dans son travail sous les nos 4, 5, 6 et 7 :

	4	5	6	7
SiO^2	10,48	17,23	17,38	11,33
Al^2O^3	46,71	39,96	30,52	47,66
Fe^2O^3	2,13	2,57	1,85	3,10
CaO	39,79	38,84	46,72	34,87
MgO	1,04	1,29	2,28	3,70
Perte au feu	0,32	0,14	0,78	0,17

Au point de vue de leur constitution intime, M. Bates les a

examinés au microscope polarisant et il a trouvé pour trois d'entre eux, les nos 4, 5 et 7, les compositions suivantes :

Constituants principaux : $2CaOAl^2O^3SiO^2$ et $CaOAl^2O^3$;

Constituants secondaires : $2CaOSiO^2$.

Pour le no 6 c'est au contraire, le silicate bicalcique $2CaOSiO^2$ qui est le constituant principal avec l'aluminate demi-calcique $3CaO5Al^2O^3$, l'aluminate monocalcique $CaOAl^2O^3$ n'entrant que comme constituant secondaire.

Les ciments industriels que nous avons fabriqués contiennent du fer en quantité importante puisque la matière première employée, la bauxite, en contient. En supposant que le fer y existe à l'état réduit ou à celui d'oxyde non combiné, ils répondent sensiblement à la formule :

$$SiO^2,2CaO + Al^2O^3,CaO.$$

La base de pareils ciments est l'aluminate monocalcique ; le silicate bicalcique n'est qu'un constituant secondaire. Mais lorsque la proportion de $SiO^2,2CaO$ augmente au delà de certaines limites, le produit arrive à perdre sa valeur hydraulique.

Nous poursuivons encore à l'heure actuelle l'étude au microscope polarisant de ces ciments.

II. — Propriétés des ciments alumineux.

Prise et durcissement. — Dès nos premières expériences, nous avons trouvé, chose qu'on ne prévoyait pas alors, que le ciment alumineux est un ciment à prise lente. Le commencement de la prise se produit deux ou trois heures après le gâchage, aussi bien à l'air humide que sous l'eau. Mais son durcissement est très rapide ; l'intervalle qui s'écoule entre le commencement et la fin de la prise ne dépasse pas généralement une heure. La réaction de prise est tellement énergique que dans un cube en pâte pure de 0m,20 d'arête, la température intérieure atteint et dépasse 150° à la fin du durcissement.

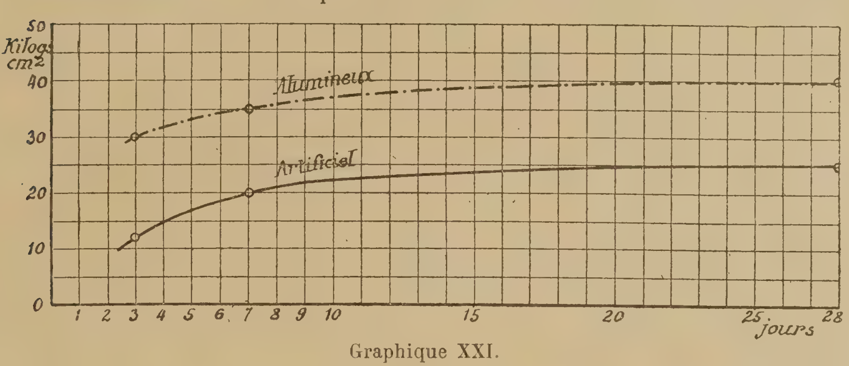
Dans la courbe de durcissement qui, comme nous l'avons indiqué, est une branche d'hyperbole, le ciment alumineux a une asymptote très éloignée de l'axe des x et une tangente à l'origine presque verticale. Dès 24 heures, ils se rapprochent de l'asymptote.

La prise se fait, ainsi que l'indique M. Bates, par la transforma-

tion de l'aluminate monocalcique Al^2O^3CaO en aluminate tricalcique $Al^2O^3,3CaO$ avec mise en liberté d'alumine. Cette mise en liberté d'alumine est très facilement constatable et nous avons souvent trouvé des briquettes recouvertes d'une pellicule blanche colloïdale qui était de l'alumine mise en liberté.

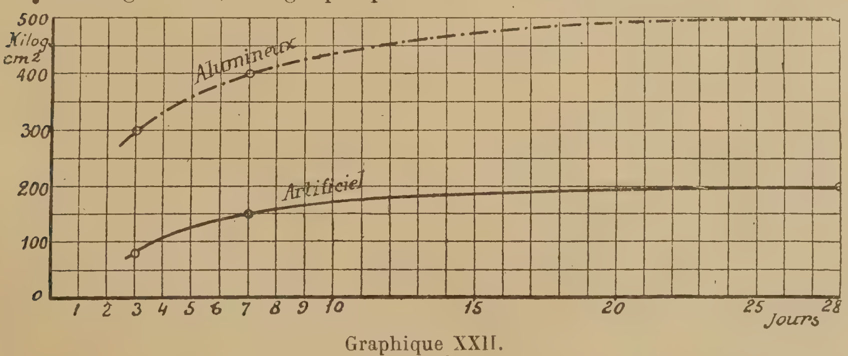
Retrait. — Comme tous les ciments, le ciment alumineux a un certain retrait, plus important en pâte pure qu'en mortier. Mais des essais comparatifs faits avec le ciment Portland, non seulement dans notre laboratoire, mais sur plusieurs chantiers industriels, nous avons pu conclure que ce retrait n'était pas supérieur, et dans certains cas même était inférieur à celui du ciment artificiel.

Résistances. — La rapidité du durcissement du ciment alumi-



Graphique XXI.

neux est telle qu'à 24 heures ou 48 heures, les résistances sont déjà très grandes, les graphiques XXI et XXII donnent la compa-



Graphique XXII.

raison des résistances à la traction et à la compression de ce ciment avec celle d'un portland artificiel de bonne qualité.

Tableau LVII. — **Essais de résistance de mor**

Conservation

N° D'ORDRE	PRISE		RÉSISTANCE A LA TRAC			
	Commencement	Fin	1 jour	2 jours	3 jours	7 jours
Échantillon 1............	3 h. 35	4 h. 15	24,4	25,8	27,1	23
Échantillon 2............	3 h. 10	4 h. 35	22,5	20,1	21,6	28,9
Échantillon 3............	0 h. 50	1 h. 20	25,1	35,9	27,8	30,4
Échantillon 4............	1 h. 05	1 h. 40	30,2	30,1	35,5	26,6
Échantillon 5............	3 h. 30	4 h. 15	19,8	23,4	26,6	26,1

Nous donnons ci-dessus (tableau LVII) les résistances que nous avons obtenues avec ce ciment ; elles ne dépendent pas du mode de fabrication. Tous ces essais ont porté sur des mortiers 1/3 plastiques, car comme l'a remarqué également M. Bates, les résistances en mortier sont aussi élevées que les résistances en pâte pure, et pratiquement ce sont les résistances en mortier qui intéressent.

Les prises sont déterminées sous l'eau.

Les briquettes ont été immergées 24 heures après gâchage.

Les résistances à 24 heures sont donc des résistances à l'air humide.

Les résistances sont exprimées en kg/cm^2.

Le mode de conservation des éprouvettes à l'air, air humide ou sous l'eau, n'a que peu d'influence ainsi qu'il ressort du tableau ci-dessous :

Échantillon 6.

CONSERVATION	PRISE		RÉSISTANCE A L'ÉCRASEMENT en kg/cm^2			
	Commencement	Fin	2 jours	3 jours	7 jours	28 jours
Air humide	3 h. 50	4 h. 40	305	343	375	555
Eau	4 h. 10	5 h. 15	330	380	405	535

tier 1/3 plastique de ciment alumineux.

sous l'eau.

TION			RÉSISTANCE A LA COMPRESSION						
28 jours	3 mois	6 mois	1 jour	2 jours	3 jours	7 jours	28 jours	3 mois	6 mois
27,8	27,9		323	380	400	412	443	500	
30	24,2	33	200	275	310	365	443	450	530
			480	580	615	720			
29,5			425	485	505	610	630		
			255	350	450	565	570		

Car le ciment alumineux se conserve très bien à l'eau, contrairement à ce qu'avait cru pouvoir déduire M. Bates de ses expériences.

La proportion d'eau de gâchage au contraire influe sur les résistances d'une façon assez sensible et des expériences que nous avons faites il nous paraît que la formule 55 + 1/5 P admise pour les ciments ordinaires donne, pour le ciment alumineux une pâte trop liquide ce qui diminue les résistances.

L'addition de proportions même très faibles de chaux grasse ou de ciment Portland rendent ce ciment instantané (tableau LVIII).

Tableau LVIII.

		PRISE	
		COMMENCEMENT	FIN
Ciment I	Essai témoin	2 h. 35	4 h. 45
	Additionné de 10 % de chaux grasse	0 h. 04	0 h. 07
Ciment II	Essai témoin	6 h. 55	10 h.
	Additionné de 10 % de chaux grasse	0 h. 02	0 h. 05
Ciment III	Essai témoin	6 h. 45	8 h. 40
	Additionné de 10 % de chaux grasse	0 h. 02	0 h. 04

L'addition de gypse n'augmente pas les résistances ainsi que le

montrent les tableaux LIX-LX que nous empruntons à l'ouvrage de M. Bates.

De ces essais de résistance à la traction et à la compression et de leur examen attentif résulte, à notre avis, la nécessité de supprimer les essais à la traction, au moins pour ce ciment alumineux et de les remplacer par les essais à l'écrasement.

Tableau LIX. — **Résistance à la traction du mortier type 1 : 3.**
(Moyenne de 3 échantillons) kilogrammes par centimètre carré.

CIMENT NUMÉRO		1	2	3	4	5	6	7	8
A 24 heures	(conservé dans l'eau)								
	sans plâtre.........	25,9	19,2	18,9	29,0	10,9	15,4	24,1	23,1
	avec —	26,6	20,7	13,7	24,9	10,9	12,2	17,5	25,9
A 7 jours	(conservé dans l'eau)								
	sans plâtre.........	28,0	27,0	27,0	19,6	11,9	12,2	20,7	48,3
	avec —	25,2	21,4	25,2	23,5	11,9	8,1	15,8	27,3
A 28 jours	(conservé dans l'eau)								
	sans plâtre.........	30,5	22,4	36,7	23,5	11,9	19,6	20,3	37,8
	avec —	21,7	41,7	24,1	21,7	12,2	7,0	20,7	19,6
—	(conserv. combinée)								
	sans plâtre.........	51,1	21,4	43,0	24,2	25,5	28,4	39,2	58,1
	avec —	50,4	39,9	41,0	29,0	25,9	20,0	36,0	37,1
A 90 jours	(conservé dans l'eau)								
	sans plâtre.........	30,8	27,7	39,2	26,2	15,8	20,0	24,5	53,9
	avec —	32,6	33,6	27,3	24,9	12,0	9,5	25,9	14,0
A 26 semaines	(conservé dans l'eau)								
	sans plâtre.........	36,8	27,3	40,2	35,0	21,0	17,2	27,0	41,3
	avec —	36,5	26,2	33,6	29,9	11,4	11,9	25,2	26,6
— —	(conserv. combinée)								
	sans plâtre.........	41,6	35,0	63,0	28,0	37,5	42,3	40,3	67,2
	avec —	36,7	31,1	46,5	38,9	37,8	22,1	41,7	29,4
A 1 an	sans —	36,7	29,8	42,7	30,5	22,4	20,7	27,3	49,0
	avec —	38,5	32,9	34,3	30,8	13,0	9,8	23,1	32,2
A 3 ans	sans —	50,0	42,3	39,2	38,1	24,5	23,5	29,8	43,1
	avec —	38,9	32,3	23,5	40,6	18,2	10,9	14,0	32,2

Si l'on regarde uniquement les essais à la traction il apparaîtrait en effet qu'il se produit une régression dans la résistance pour un grand nombre d'entre eux et, de plus, l'augmentation de résistance presque insignifiante ne donne pas une idée du durcissement.

Les essais à la compression au contraire sont d'une régularité remarquable.

Action des eaux sulfatées. — Les essais que nous avons faits avec le ciments alumineux ont montré qu'il était pratiquement indécomposable. Et les expériences qui ont été faites depuis 1908 tant

au laboratoire des Ponts et Chaussées qu'à celui de la ville de Paris, ont montré que ces ciments résistent à tous les procédés d'attaque qu'on a l'habitude d'employer aux laboratoires pour amener la décomposition des ciments ordinaires.

Tableau LX. — **Résistance à la compression de mortier 1 : 3.**

(Moyenne de 3 échantillons) kilogrammes par centimètre carré.

CIMENT NUMÉRO		1	2	3	4	5	6	7	8
A 24 heures	(conservé dans l'eau)								
	sans plâtre.........	250	298	157	309	72	94	152	200
	avec —	200	213	128	237	74	74	131	190
A 7 jours	(conservé dans l'eau)								
	sans plâtre.........	416	333	346	342	98	88	360	602
	avec —	206	286	172	154	83	66	120	300
A 28 jours	(conservé dans l'eau)								
	sans plâtre.........	263	276	453	370	128	99	275	549
	avec —	195	248	178	208	81	55	99	258
—	(conserv. combinée)								
	sans plâtre.........	477	533	560	448	200	219	496	748
	avec —	280	386	325	360	186	162	252	519
A 90 jours	(conservé dans l'eau)								
	sans plâtre.........	276	331	502	320	145	118	364	578
	avec —	211	324	225	175	102	64	184	332
A 26 semaines	(conservé dans l'eau)								
	sans plâtre.........	373	320	543	243	203	132	252	447
	avec —	270	340	324	159	154	103	216	322
— —	(conserv. combinée)								
	sans plâtre.........	421	370	770	244	270	304	426	562
	avec —	351	393	497	345	248	213	380	524
A 1 an	sans —	213	310	372	224	169	162	365	626
	avec —	200	251	211	164	120	48	141	298
A 3 ans	sans —	239	347	414	223	238	163	213	605
	avec —	197	288	218	191	195	94	174	230

M. Séjourné, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, sous-directeur à la Compagnie P.-L.-M., ayant à reconstruire le souterrain de Brauss, sur la ligne de Nice à Coni, souterrain dont les maçonneries avaient été complètement détruites par les eaux sulfatées, a fait depuis 1916 toute une série d'expériences où il a étudié, comparativement au ciment alumineux, tous les autres ciments. Pour cela, dans une rigole où coulaient des eaux séléniteuses du tunnel, on immergeait des blocs faits à des dosages différents. De tous les ciments qui étaient proposés pour la construction du tunnel, seuls les ciments alumineux ont résisté à ces essais très durs et, non seulement ils ont pu supporter le contact des eaux sulfatées, mais

on a pu les gâcher en employant comme sable de l'anhydrite (sulfate de chaux non hydraté) sans pour cela arriver à les décomposer.

Le ciment alumineux s'est donc imposé à l'attention de tous. Nous en poursuivons l'étude tant industrielle que de laboratoire et nous souhaitons vivement, comme nous l'indiquions dans notre avant-propos, que tous nos résultats soient contrôlés, complétés, discutés et précisés.

CHAPITRE VIII

ANNEXES

CONFÉRENCE FAITE LE 7 JUILLET 1911
aux Élèves de l'École du Génie Militaire.

I. — Constitution chimique des chaux et ciments.

L'étude de la constitution chimique des chaux et ciments est une des questions les plus complexes qui soient actuellement.

Depuis les travaux de M. H. Le Chatelier, une littérature abondante paraît journellement qui prouve qu'on est loin d'être fixé sur ce sujet.

On ne peut que faire le résumé très bref des faits qui paraissent le mieux établis.

Les corps donnant avec de la chaux des produits hydrauliques sont la silice et l'alumine ; accessoirement l'oxyde de fer entre en jeu, mais sa présence n'est pas nécessaire et ses combinaisons sont mal connues.

Pour se reconnaître dans les nombreuses combinaisons qui peuvent se produire entre ces éléments au cours de la fabrication des ciments, on a d'abord étudié les composés binaires : silicates de chaux et aluminates de chaux. Ce n'est guère que depuis deux ou trois ans qu'on commence à s'occuper des composés ternaires : silico-aluminates de chaux.

1° **Silicates de chaux.** — Ils répondent aux formules :

SiO^2,CaO, $SiO^2,2CaO$, $SiO^2,3CaO$.

SiO^2,CaO, silicate monocalcique ou wollastonite qui serait di-

morphe : rhomboédrique, comme son isophorme, la calcite ou spath d'Islande CO^2,CaO, et monoclinique. Elle fond vers 1.510° C.

La wollastonite naturelle est toujours monoclinique. L'autre forme (ou pseudo-wollastonite de Day et Allen) n'a été observée que produite artificiellement.

$SiO^2,2CaO$, silicate bicalcique, dont le point de fusion correspond à la montre Seger n° 38, soit plus de 1.900°.

$SiO^2,3CaO$, silicate tricalcique, dont le point de fusion correspond à la montre Seger n° 39, soit plus de 1.950°.

Certains auteurs admettent un autre silicate de formule :

$$2SiO^2,5CaO,$$

mais son existence n'est pas démontrée d'une façon définitive.

Le silicate monocalcique SiO^2,CaO n'est pas hydraulique.

Le silicate bicalcique, $SiO^2,2CaO$, est un composé des plus curieux : il est tantôt stable et hydraulique, tantôt poussiéreux et inerte (d'après les expériences du laboratoire, le silicate trempé ne serait pas hydraulique ou très peu).

Les Américains, avec Day et Sheperd, donnent une explication qui paraît plausible, surtout depuis que M. Le Chatelier a montré qu'il n'y avait probablement pas d'acides siliciques définis, et que toutes les gelées de silice n'étaient qu'un mélange de silice amorphe très fine avec de l'eau en diverses proportions.

On observe sur ce silicate un phénomène analogue à celui qu'on a étudié sur le fer.

Ce corps existerait sous trois formes allotropiques :

1° La forme α, stable au-dessus de 1.450°;

2° La forme β, stable de 600° à 1.450°.

Ces deux formes de densité 3,27.

3° La forme γ, stable au-dessous de 600° et de densité 3,14.

Cette forme γ est une forme poussiéreuse et non hydraulique : on voit à la sortie des fours, quand on tire les pierres encore chaudes, celles-ci se pulvériser en se refroidissant.

La forme β se transforme toujours en forme γ, et ne se conserve pas par une trempe à 600°.

Le silicate α peut au contraire exister à la température ordinaire après avoir subi une trempe aux environs de 1.450°.

Pour qu'il soit hydraulique, il faut probablement cuire à la tem-

pérature de fusion et assez longtemps pour que la réaction ait eu lieu.

On obtient facilement la forme α trempée, ne tombant pas en poussière à froid ainsi qu'on le fera devant vous, à l'aide de petites pastilles. Mais ces pastilles ne sont pas hydrauliques.

Les différences de densité entre les formes β et γ expliquent le phénomène de la pulvérisation, que l'on observe aussi bien au laboratoire que dans l'industrie.

Quant au silicate $SiO^2,3CaO$, on n'est pas d'accord sur son existence. Des savants bien autorisés prétendent qu'il est le constituant actif des ciments; d'autres, que son existence est impossible, et que le corps envisagé est une dissolution de CaO dans $SiO^2,2CaO$. Les expérimentateurs allemands penchent pour cette dernière conclusion.

Dans tous les cas, composé défini ou solution solide, ce corps est tantôt gonflant, tantôt stable aux essais à chaud.

Ce phénomène s'expliquerait, dans le cas de la dissolution solide, par la présence de CaO cristallisée, s'éteignant lentement et sans gonflement.

M. Le Chatelier a obtenu le silicate tricalcique en partant du chloro-silicate et le décomposant par la vapeur d'eau.

En fait, le silicate tricalcique absolument pur n'a jamais été obtenu, en cristaux, directement. Les expérimentateurs qui l'ont étudié n'ont jamais présenté que des produits contenant au moins 1 0/0 d'alumine. Le silicate $2SiO^2,5CaO$ ou $SiO^2 2,5CaO$ a été étudié par Schott. Il est certain qu'avec 2 équivalents de silice et 5 équivalents de chaux, on obtient un produit très hydraulique.

Mais Schott n'a jamais fait la preuve que ce silicate soit un composé défini, et, si l'on admet que $SiO^2,3CaO$ est une solution, il est difficile d'admettre qu'il n'en soit pas ainsi pour $2SiO^2,5CaO$. Tout ce que l'on peut dire, c'est qu'on obtient, en général, un ciment plus stable avec $2SiO^2,5CaO$ et $SiO^2,2,8CaO$.

2° **Aluminates.** — Les aluminates de chaux ont fait l'objet d'une étude récente en Amérique. On a observé les phases suivantes :

$$Al^2O^3,CaO, \quad 3Al^2O^3,5CaO, \quad Al^2O^3,3CaO,$$

plus deux formes instables.

Entre CaO et la phase la plus basique : $Al^2O^3,3CaO$, il n'y a point

de mélange eutectique. L'aluminate tricalcique $Al^2O^3,3\,CaO$ est de densité 3,04. Il est facilement attaqué par l'eau chaude ou froide.

Il y a un mélange eutectique entre $3\,Al^2O^3,5\,CaO$ et $Al^2O^3,3\,CaO$, qui contient 52 0/0 d'alumine et fond à 1.380° C.

Un autre mélange eutectique entre $3Al^2O^3$, $5CaO$ et Al^2O^3,CaO fond à la même température avec une teneur en alumine très peu supérieure.

Le composé $3Al^2O^3,5CaO$ fond d'ailleurs presque à la même température et est très difficile à distinguer de ces eutectiques. Sa densité est 2,82.

L'alumine monocalcique, ou spinelle, fond à 1.590°. Sa densité est 2,98.

3° **Silico-aluminates de chaux.** — Il existe, d'autre part, dans la nature, des composés ternaires de silice, alumine et chaux, parfaitement définis :

Gehlenite	$Si^2O^{10}Al^2Ca^3$
Mélitite (ou Humholdtilite)	$Si^9O^{36}Al^2Ca^{12}$
Anorthite (ou Christianite)	$Si^2O^8Al^2Ca$
Grenat grossulaire	$Si^3O^{12}Al^2Ca^3$
Heulondite	$Si^6O^{22}Al^2Ca^3H^{12}$
Idocrose	$Si^7O^{29}Al^8Ca^8H^2$
Méionite	$Si^6O^{25}Al^6Ca^4$

Il s'ensuit qu'il y a bien des chances pour que dans la cuisson des ciments on n'obtienne pas des composés binaires, mais des composés ternaires, ou même quaternaires.

On a étudié au laboratoire de la Société un certain nombre de composés ternaires capables de donner des ciments fondus. Il serait en effet très intéressant, si le prix de revient le permettait, d'obtenir des ciments par fusion. On aurait alors des produits homogènes, d'une façon assurée, et on serait débarrassé du souci d'une cuisson toujours identique.

Partant de ce principe que les ciments obtenus par fusion doivent contenir du silicate bicalcique SiO^2, $2CaO$ et de l'aluminate monocalcique Al^2O^3, $3CaO$, j'ai démontré qu'on obtenait des ciments fondus de bonnes résistances, depuis les formules :

$$SiO^2, Al^2O^3, 4CaO$$

jusqu'à :

$$2SiO^2, Al^2O^3, 5CaO$$

en passant par :

$$Al^2O^3,CaO.$$

Ces formules concordent avec les chiffres trouvés par les Allemands et publiés dans la *Zentralblatt fü Analyse und Chemie der Zementindustrie* de Vienne, au mois d'Avril 1910.

Mais les auteurs allemands, au lieu d'admettre un composé des deux corps SiO^2, $2CaO$ et Al^2O^3, CaO, envisagent de préférence une solution de silice dans de l'aluminate tricalcique $Al^2O^3 (CaO)^3$. Il est bien difficile, dans l'état actuel de ces études, de se prononcer définitivement.

M. Le Chatelier a également étudié d'autres composés ternaires : les aluminates ferrites de chaux (*Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques*, 1904, Dunod et Pinat).

Ce préambule ayant donné une idée de la composition théorique des ciments, on peut se demander ce que c'est que la « chaux hydraulique ».

La chaux hydraulique n'est qu'un mélange de grains de ciment, de grains de chaux pure hydratée : $Ca (OH)^2$, et de matières inertes, en particulier les poussières de SiO^2, 2 CaO, sous la forme γ.

Il en résulte que, suivant la nature et la qualité des grains de ciment, leur proportion dans le mélange, celle de la chaux hydratée et des matières inertes, on pourra obtenir une gamme de produits qui auront des propriétés hydrauliques plus ou moins accentuées, et qui s'appelleront : chaux moyennement, éminemment hydrauliques et ciments.

Où s'arrête la chaux? Où commence le ciment?

Vicat avait essayé d'établir une distinction par la considération de l'indice d'hydraulicité, cet indice étant défini comme le rapport en poids des éléments acides combinés (SiO^2 et Al^2O^3) aux éléments basiques (CaO et MgO).

Il a bien fallu se rendre compte que cette notion n'avait aucune valeur, puisqu'elle ne tient pas compte de la différence respective des poids moléculaires de la silice et de l'alumine, différence qui est très grande et de laquelle il résulte que la silice peut saturer jusqu'à 2,8 fois son poids de CaO, tandis que l'alumine ne peut saturer que 1,6 fois son poids de CaO. Les produits siliceux ont donc un indice beaucoup plus faible.

En outre, la proportion de SiO^2, $2CaO$, sous la forme γ, matière

inerte à peu près au même titre que $Ca(OH)^2$, mais très chargée en silice, contenue dans deux chaux de valeurs égales, peut changer totalement leurs indices.

Il n'est pas plus logique d'appeler chaux les produits qui pulvérisent à l'extinction et ciments ceux qui résistent.

On a eu l'occasion, aux usines de Lafarge, de préparer industriellement des produits qui contenaient au maximum 3 0/0 de chaux, c'est-à-dire qui absorbaient 1 0/0 d'eau à l'extinction, et qui pulvérisaient totalement en présence de vapeur d'eau parce que la chaux en excès était répartie d'une façon très homogène à l'intérieur de la masse. Personne pourtant ne pourrait refuser le nom de ciment à ces produits qui donnaient en pâte pure plus de 45 kilogrammes de résistance à la traction au bout de 7 jours.

M. Le Chatelier a, d'un autre côté, essayé de préciser les limites extrêmes de composition que peuvent présenter les ciments, en partant de ce fait qu'un ciment ne doit pas renfermer de chaux libre, ce qui fixe un maximum à la proportion en chaux ; la teneur minima en chaux étant, d'autre part, déterminée par ce fait qu'il doit y avoir le minimum de pulvérisation spontanée au sortir du four.

M. Le Chatelier est arrivé ainsi aux formules :

$$\frac{CaO + MgO}{SiO^2 + Al^2O^3} \leqq 3 \qquad \text{et} \qquad \frac{CaO + MgO}{SiO^2 - (Al^2O + Fe^2O)^3} \geqq 3,$$

la quantité de chaque corps étant exprimée par son poids moléculaire.

La majorité des bons ciments ont des analyses répondant à ces conditions. Mais il ne faut pas perdre de vue qu'un bon ciment se caractérise bien plus par ses qualités de résistance que par sa composition chimique.

Il suffit qu'il ne contienne pas de corps nuisible. Les ciments Portland surdosés en chaux ont généralement des résistances à la traction et à la compression supérieures à celles des ciments où la chaux est toute à l'état combiné, bien entendu à condition que la chaux libre, non combinée ou non à l'état de dissolution solide, ait été éteinte rationnellement.

Dans de telles conditions, on voit qu'il est bien difficile de donner une définition satisfaisante de la chaux et du ciment.

Il est alors naturel qu'on se demande comment, dans un même four, on obtient de la chaux et du ciment.

II. — Étude des calcaires.

Les produits sortant des fours (à chaux) contiennent des poussières lourdes et des roches. Les poussières lourdes ne sont autres que du silicate bicalcique : SiO^2, $2CaO$, sous la forme γ.

Les roches sont des mélanges de chaux vive (CaO) et de ciment.

Lors de l'extinction, cette chaux vive entraîne la pulvérisation des tout petits grains de ciment. Les gros grains ne sont pas attaqués. Ceux-ci deviennent le ciment de grappiers, tandis que le mélange de chaux vive éteinte, de petits grains de ciment et de poussières lourdes devient la chaux hydraulique.

Pourquoi obtient-on des produits si différents ? Parce que le calcaire naturel n'est pas homogène. Pour apprécier l'homogénéité des calcaires, on avait depuis longtemps adopté au laboratoire de Lafarge l'attaque de plaques de calcaire par l'acide chlorhydrique dilué. Les parties les plus calcaires se dissolvaient, les parties les plus siliceuses résistaient. On obtenait ainsi des reliefs et des creux dont l'importance et la répartition donnaient une idée de l'homogénéité de la pierre.

M. Grandjean, ingénieur des mines, professeur à l'École des Mines de Saint-Étienne, a découvert sur ces entrefaites que le bleu de méthylène colorait l'argile et la silice, sans colorer le calcaire.

Signalons à ce propos que, dans un travail récent de Keisermann, il a été établi trois réactifs colorants bien nets, dont chacun colore un des éléments du ciment et un seul. Ce sont :

Le bleu de méthyle, qui ne colore que la silice libre ;

Le bleu breveté, qui colore l'alumine et les aluminates, en solusolution alcaline ;

L'anthrapurpurine, qui colore tous les composés calcaires, en solution alcoolique.

J'ai eu alors l'idée d'examiner la répartition de la silice dans le carbonate de chaux en polissant celui-ci, le teintant au bleu de méthylène, et, après lavage à l'alcool, en le regardant au microscope.

Mais, au microscope, le champ est tellement réduit qu'on ne

peut se faire une idée de la répartition de la silice dans une étendue assez grande. L'examen miscrocopique permettrait plutôt de se rendre compte de la grosseur des grains de silice ou d'argile.

En ce qui concerne la répartition, nous avons adopté une autre méthode qui consiste à colorer au bleu de méthylène de grandes surfaces de calcaire polies, après avoir imperméabilisé à la paraffine les couches sous-jacentes.

En traitant ainsi la plaque colorée par l'acide chlorhydrique dilué, les parties les plus calcaires réapparaissent en clair.

III. — **Prise et durcissement.**

Si l'étude de la composition des produits hydrauliques présente de très nombreuses difficultés, l'étude du mécanisme de leur prise et de leur durcissement n'est pas moins ardue.

On ne peut en donner ici qu'un aperçu général.

On peut dire que, dans le mécanisme du durcissement, il y a trois séries de phénomènes :

a) Un phénomène chimique, consistant dans une décomposition et une hydratation ;

b) Un phénomène physique de cristallisation (de solutions sursaturées) :

c) Un phénomène mécanique de durcissement.

Les silicates de chaux actifs, c'est-à-dire les silicates qui durcissent au contact de l'eau se décomposent en donnant un silicate monocalcique hydraté : SiO^2. $CaO, + 2{,}5 H^2O$.

Tous les silicates perdent donc, en présence de l'eau, de la chaux, qui s'hydrate pour donner le corps $Ca(OH)^2$ (cristallisé).

Les aluminates, au contact de l'eau, donneraient aussi naissance à un aluminate hydraté, probablement : $3 Al^2O^3, 5 CaO + n H^2O$, non encore tout à fait déterminé.

L'aluminate monocalcique perdrait donc de l'alumine qui s'hydraterait sous forme colloïdale et aiderait au durcissement, et l'aluminate tricalcique perdrait de la chaux.

La prise de l'aluminate monocalcique est relativement lente.

Celle de l'aluminate tricalcique est très rapide. L'aluminate monocalcique, en présence de chaux, donne une prise très rapide.

Voilà par exemple un aluminate fondu dont la composition est :

SiO^2	11 0/0
Al^2O^3	36 —
Fe^2O^3	11 —
CaO	40 —

Le début de sa prise a lieu au bout de vingt minutes, la fin au bout d'une heure. C'est un ciment ayant un durcissement rapide, mais on ne peut pas dire que ce soit un ciment prompt.

Si on le mélange moitié par moitié au ciment n° 1 Lafarge, la prise débute en une minute et est terminée en cinq minutes. Il en est de même avec le ciment maritime.

Si on mélange le même ciment alumineux avec du ciment lent de Contes-les-Pins (début deux heures et fin six heures), à raison de 25 0/0 du premier pour 75 0/0 du deuxième, on obtient un ciment prompt qui fait prise en moins de une minute, et qu'on a toutes les peines du monde à gâcher.

D'une manière générale, l'addition d'un aluminate de chaux à n'importe quel produit hydraulique (sauf les ciments de laitier) accélère remarquablement sa prise.

Ces phénomènes ne sont pas expliqués.

Le phénomène de cristallisation, qui accompagne le durcissement du ciment, a été étudié complètement par M. Le Chatelier. Il a montré qu'il pouvait se faire avec une très faible quantité d'eau.

Les corps existant dans le ciment non hydraté se décomposent rapidement au contact de l'eau. Celle-ci devient rapidement sursaturée par rapport aux nouveaux corps formés et dissous.

Ceux-ci se séparent alors en cristaux et l'eau peut dissoudre et attaquer une nouvelle quantité de sels actifs qui cristallisent à leur tour, et ainsi de suite indéfiniment.

Il se forme donc des dissolutions sursaturées et la forme des cristaux influe sur la résistance du liant après prise. On constate généralement qu'il se forme des prismes extrêmement déliés, soudés par une de leurs extrémités autour de points centraux, de façon à constituer de petits groupements sphériques.

Pour M. le Dr Michaelis senior, tout le phénomène du durcissement reposerait sur la formation d'un hydrogel de silice et d'alumine qui enroberait les cristaux de $Ca(OH)^2$ et assurerait leur adhérence en se transformant peu à peu, par perte d'eau et absorption de chaux, en un gel très dur et très solide.

Pour M. Schott, les matières ne faisant pas prise, gâchées avec de l'eau et soumises à une forte pression, atteignent une certaine résistance due au rapprochement de leurs molécules, par exemple briques silico-calcaires.

Cela pourrait bien être le mode d'action de l'hydrogel de Michaelis qui par fixation d'une grande quantité d'eau augmenterait de volume et provoquerait ainsi de fortes tensions au sein même du ciment en prise.

Lorsque le rapprochement des particules solides est produit, la dureté définitive dépend de la cohésion intime des cristaux et de leur adhérence mutuelle.

Le phénomène de cohésion nous échappe évidemment.

Quant à l'adhérence, elle est d'autant plus grande que « le volume des espaces vides provenant de l'excès d'eau employé dans le gâchage est moindre, que chaque cristal, pour un poids donné de matière, présente un plus grand développement de surface, que les cristaux seront groupés de façon à augmenter le volume des espaces vides, en en diminuant le nombre et en les isolant les uns des autres » (Le Chatelier).

Ce sont ces variations d'adhérence qui expliquent presque exclusivement les différences considérables de résistance que présentent souvent des liants analogues.

Ces points étant bien établis, on peut dire que la résistance finale des chaux et ciments se fixe généralement à six mois : ce serait donc à ce moment que le durcissement est terminé définitivement.

On n'entend pas, par là, dire qu'il n'y a plus de silicates à décomposer, tout au contraire, le microscope montre qu'une grande partie du ciment n'est pas décomposée, même dans les ciments ayant plusieurs années de conservation.

On n'est d'ailleurs pas fixé sur le rôle de CO^2 pendant et après cette période. Il est certain que son action est très utile à la consolidation des mortiers, et contribue à les rendre imperméables. Non seulement l'acide carbonique transforme en carbonate la chaux mise en liberté, mais il décompose aussi les silicates, particulièrement le silicate bicalcique (forme γ) inattaquable à l'eau.

Aussi, la résistance des liants hydrauliques est-elle toujours bien plus considérable à l'air humide qu'à l'eau.

Il semble bien certain que le durcissement d'un liant est continu ;

rapide au début, il croît ensuite plus lentement, et il n'y a pas lieu de distinguer entre la prise et le durcissement. Mesurer la prise d'un liant, c'est donc simplement voir à quel moment il a atteint une résistance déterminée.

En résumé, les seuls corps hydrauliques employés, dans la pratique, sont les silicates, les aluminates et les silico-aluminates de chaux.

Les ciments Portland dits à prise lente, artificiels, naturels, ou de grappier, les chaux et les ciments prompts ne sont que des mélanges en proportions diverses et variables de ces divers corps et de chaux éteinte.

Il est cependant probable que les ciments prompts, cuits à très basse température, contiennent encore des silicates d'alumine, sans doute à l'état d'argile déshydratée, corps dont on reparlera plus loin.

C'est l'hétérogénéité des calcaires naturels qui fait qu'on obtient dans leur cuisson, deux produits différents en apparence, mais qui ne diffèrent en réalité que par la proportion des éléments constitutifs : la chaux (CaO) et le ciment.

IV. — Extinction des chaux et ciments.

Ceci dit, il n'est pas sans intérêt de voir comment on peut oser mettre en présence de l'eau, pour obtenir l'extinction de la chaux vive, des produits que l'eau attaque si facilement.

On a démontré, pour la première fois, croyons-nous, dans le laboratoire de la Société Pavin de Lafarge, que, au-dessus de 120°, les silicates et les aluminates ne sont plus attaqués par l'eau : on peut donc brasser impunément un ciment dans la vapeur d'eau à 120° sans en diminuer la qualité et éteindre aussi facilement la chaux vive, soit dans les produits sortant des fours, soit dans les produits moulus.

On a constaté des phénomènes vraiment curieux qui montrent qu'il y a une différence notable entre la température de déshydratation des silicates et celle des aluminates. Cette dernière est plus élevée, et l'on peut transformer ainsi un ciment prompt en ciment lent, en hydratant ses aluminates.

La Société Pavin de Lafarge possède des appareils extincteurs,

brevetés par elle, pour l'extinction des produits bruts des fours à gaz et pour celle des ciments moulus.

Dans les fosses d'extinction, la température s'élève par suite de l'hydratation de CaO, mais l'eau en excès vaporisée va se condenser dans les parties des tas déjà refroidies, au-dessous de 100°, et les silicates s'hydratent. C'est l'eau fixée sur les silicates qui vient, à froid, pendant le silotage des ciments, hydrater les parties de chaux qui ont échappé à l'extinction et supprimer les gonflements.

Ce phénomène se comprend très bien si l'on remarque que, ces silicates se déshydratant aux environs de 120° et la chaux à 400°, la tension de vapeur des silicates est bien plus forte que celle de la chaux à la température ordinaire.

Ce mode d'extinction est donc inférieur à l'extinction mécanique et l'extinction en cylindres tournants s'impose de plus en plus.

V. — Emploi des chaux et ciments en mortier. — Adhérence.

M. Feret a montré le premier d'une façon tangible l'influence des sables et de leur composition sur la résistance des mortiers. Il a publié sur cette question des travaux très intéressants, et, si l'on ne peut ici en donner une idée très complète, du moins pourra-t-on en exposer l'essentiel.

Il est nécessaire tout d'abord de bien savoir ce que c'est que la compacité d'un mortier. C'est la somme des volumes solides C + S (ciment et sable) contenus dans le volume unitaire du mortier.

A dosage égal et à sables différents, les résistances sont d'autant plus grandes que la compacité est plus forte. En général, cette compacité est faible avec les sables à grains homogènes et d'autant plus faible que les grains sont plus fins.

La meilleure composition d'un mortier se rencontre avec un sable n'ayant pas de grains moyens compris entre 2 millimètres et 1 millimètre, et telle que la somme des gros grains soit égale au double de celle des grains fins et du liant.

Cependant, à chaque liant correspond un sable déterminé.

En voici un exemple : on a préparé des mortiers à divers dosages avec de la chaux hydraulique de Lafarge et du sable concassé de Marseille et du sable d'Auberives. On a fait de même avec du ciment n° 1.

Le mortier de chaux hydraulique qui a donné le maximum de résistance est celui qui a été confectionné avec du sable sans poussière. Même chose pour le ciment n° 1.

Le mélange de chaux et de ciment a donné un mortier de résistance maxima avec le sable grains de riz, surtout pour les dosages faibles.

Avec le sable d'Auberives, la chaux maritime a donné 78 kilogrammes de résistance, le ciment n° 1 104 kilogrammes.

Avec le sable normal composé de Leucate, ces mêmes produits ont donné, dans les mêmes conditions :

La chaux maritime..................................	78 kg.
Le ciment n° 1...	99 kg.

Il aurait donc fallu préférer, pour employer avec la chaux maritime, le sable normal de Leucate, et pour le ciment n° 1 le sable d'Auberives. A 84 jours d'ailleurs, les différences se sont atténuées.

Cest encore à M. Feret que l'on doit des études sur l'adhérence des mortiers aux pierres.

Il a distingué deux adhérences : l'adhérence tangentielle et l'adhérence directe. Pour étudier cette dernière, il a inventé un appareil à prismes, dans lequel on casse, à moment constant, des prismes de 30 centimètres de long et de 5 centimètres de large. La longueur de ces prismes et le point d'application de la force sont calculés de telle sorte qu'il suffit de multiplier par 5 le nombre de kilogrammes trouvés à la rupture pour avoir l'effort de tension par centimètre carré au moment de la rupture.

Cet appareil suppose évidemment que les lois du calcul élastique sont vraies jusqu'au moment de la rupture, ce qui, en somme, n'est certainement pas exact. Néanmoins, il est peut-être destiné, dans l'avenir, à remplacer la machine Michaëlis, les essais se faisant désormais sur des prismes en mortier, et, à ce titre, il est intéressant.

VI. — **Retrait des ciments ; influence sur le béton armé.**

Jusqu'à présent, on essayait le retrait du ciment sur de longues barrettes, dont le retrait longitudinal était amplifié par un multiplicateur. Ces longues barrettes étaient très fragiles et ne pouvaient

être facilement transportées dans des milieux divers : air sec, air humide, acide carbonique sec ou humide, etc... Aussi, ai-je cherché à modifier cette méthode et tenté d'étudier le retrait du ciment en étendant celui-ci en couche mince sur de petites lames de zinc de 20 millimètres de largeur sur 130 millimètres de longueur. Au cours du durcissement, la partie du ciment située près du zinc ne peut pas se retirer à cause de son adhérence avec ce métal.

D'autre part, la partie supérieure pouvant se retirer librement, et la lame étant fixée par une de ses extrémités, l'autre se recourbe vers le haut, et la mesure de cette courbure donne une appréciation du retrait du ciment.

Si l'on fait d'ailleurs le calcul de la valeur réelle de ce retrait, on arrive très sensiblement aux mêmes valeurs que par la mesure directe du retrait des longues barrettes.

Ces essais ont déjà donné des résultats intéressants :

La finesse de mouture augmente le retrait;

L'introduction de sable et de matières inertes le diminue;

L'addition d'huile diminue le retrait;

L'addition de caséine en petites proportions (1 à 3 0/0) diminue le retrait. En plus fortes proportions (4 0/0 et au-dessus) elle l'augmente.

A ce propos, l'addition de caséine transforme le ciment en une véritable colle qui aurait été, paraît-il, la base des fresques du moyen âge et même des fresques de Pompéi. Contrairement à ce que l'on aurait pu supposer, les lames qui sont maintenues quelques jours sous l'eau ou dans l'air saturé d'humidité prennent après position à l'air libre un retrait beaucoup plus considérable que celles qui sont de suite soumises à l'action de l'air extérieur.

(Peut-être n'y a-t-il là qu'une action antiévaporatoire qui permet au ciment d'atteindre une certaine dureté, empêchant les fissures avant de subir la dessiccation rapide qui se produit à l'air libre?)

Il faut en conclure qu'un arrosage qui ne serait prolongé que pendant quelques jours aurait plutôt un effet nuisible qu'utile.

Le retrait des ciments n'a pas seulement des inconvénients au point de vue des carreaux ou des enduits, il en a encore au point de vue du sidérociment, au moins dans le cas où l'on n'arme que la partie inférieure des poutres, comme dans la petite plaquette sur zinc, où le bas de celle-ci, qui est armé, ne peut pas prendre de

retrait, tandis que le haut en prend. On peut s'en faire une idée très nette en posant sur deux supports éloignés de 20 centimètres environ une lamelle de zinc recouverte d'une mince couche de ciment : au bout d'un certain temps, on la voit fléchir, comme le montre la figure 30.

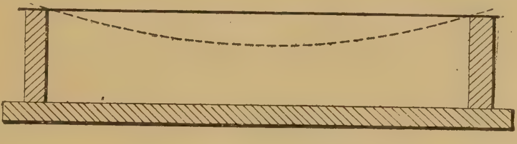
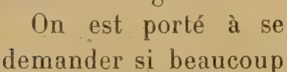


Fig. 30.



On est porté à se demander si beaucoup de planchers non armés à la partie supérieure ne prennent pas, sous l'influence du retrait, des flèches exagérées, et si cela n'a pas été la cause d'accidents.

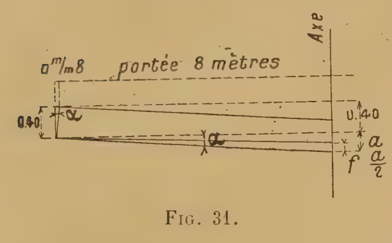


Fig. 31.

La figure 31 montre qu'une poutre de 8 mètres de portée, 40 centimètres de hauteur, prendrait une flèche de 4 millimètres sous l'influence d'un retrait de 2 millimètres, plutôt faible pour un mortier.

Il y a là un phénomène qui doit préoccuper les constructeurs, et il faudrait qu'à défaut d'une poutre à armature symétrique, on ne négligeât jamais de mettre à la partie supérieure des poutres d'un plancher les armatures nécessaires pour combattre le retrait.

VII. — **Décompositions. — Ciments fondus. — Pouzzolanes. Carbonatation.**

Les ciments comme les chaux, si soigneusement fabriqués soient-ils, ont aussi leurs ennemis.

L'immersion dans des solutions de sulfate de chaux, de sulfate de magnésie, de sulfate de potasse, de sulfate d'ammoniaque, les détruit complètement et, pour le malheur des constructeurs, les solutions de sulfate de magnésie baignent toutes nos côtes, tandis que les solutions de sulfate de chaux qui ne sont pas rares en France, se rencontrent constamment dans une grande partie de notre domaine colonial africain. Quelle est l'action des sulfates sur les liants hydrauliques? *Adhuc sub judice lis est.* Car s'il est certain que la formation du sel de Candlot, le sulfo-aluminate de chaux : $Al^2O^3, 3CaO, 3(SO^3, CaO), 30H^2O$, qui cristallise avec une énorme

quantité d'eau, est la cause des décompositions dans bien des cas, on est obligé d'avouer que, surtout dans les solutions de sulfate de chaux, les produits sans alumine finissent par disparaître, tandis que l'aluminate monocalcique résiste très bien.

Un article de revue tout récent attribue une importance énorme au chloro-aluminate de chaux : $Al^2O^3, 3CaO, 2CaCl^2, 10H^2O$.

Cela expliquerait peut-être les résultats trouvés au laboratoire de la Société, à savoir qu'à l'eau de mer, il importe davantage de diminuer l'alumine que de diminuer la chaux, tandis que, dans les eaux uniquement sulfatées, il importe davantage de diminuer la quantité de chaux présente. Mais la diminution de la teneur en chaux des ciments entraîne une diminution correspondante des résistances, ce qui est un inconvénient non négligeable, et, jusqu'à ce jour au moins, c'est un procédé qui paraît peu à recommander.

Les aluminates fondus, en effet, dont on a parlé plus haut, paraissent à la fois résister à la décomposition par le sulfate de chaux, grâce à leur faible teneur en chaux, et avoir les résistances particulièrement élevées.

D'autre part, il existe dans la nature, et on peut fabriquer artificiellement des matières où la silice et l'alumine existent à un état particulier, grâce auquel elles peuvent, à froid et en présence de l'eau, se combiner à la chaux.

Ces matières sont les pouzzolanes naturelles, telles que les cendres volcaniques, les arènes granitiques, la gaize, etc... ou artificielles, comme le laitier de certains hauts fourneaux et l'argile kaolinique cuite à 700° C.

Toutes ces pouzzolanes jouissent de la propriété d'avoir une proportion de silice et d'alumine solubles dans l'acide chlorhydrique dilué ; le phénomène est particulièrement remarquable avec l'argile déshydratée. Avant cuisson, la partie kaolinique de l'argile n'est pas attaquée par l'acide chlorhydrique, mais elle l'est par l'acide sulfurique bouillant. Après cuisson, cette partie kaolinique n'est plus attaquée par l'acide sulfurique bouillant et incomplètement par l'acide fluorhydrique. Quand on n'a pas dépassé le point de déshydratation de la kaolinite ($2SiO^2, Al^2O^3, 2H^2O$), la presque totalité de la silice et de l'alumine est soluble dans l'acide chlorhydrique dilué. On arrive à dissoudre, après des déshydrata-

tions bien faites, jusqu'à 29 0/0 d'alumine et de fer, sur un total de 33 0/0.

En mélangeant ces pouzzolanes au ciment, la silice et l'alumine qu'elles contiennent se combinent à la chaux mise en liberté pendant le durcissement du ciment, pour donner des silicates et des aluminates monocalciques, qui sont, ou passent à ce jour, pour indécomposables.

La Société Pavin de Lafarge pratique un ciment qui provient du mélange intime d'argile grillée et de ciment des fours à gaz, et nous le recommandons, sans le garantir d'une façon absolue, dans tous les cas où l'on se trouve en présence d'eaux dangereuses. Peut-être sous le climat très sec de l'Algérie pourra-t-il se comporter moins bien, l'humidité étant nécessaire à la combinaison à froid de la silice, de l'alumine et de la chaux. D'autre part, les difficultés de déshydratation industrielle sont assez grandes, au moins lorsqu'il s'agit de petites quantités.

Un phénomène qui contribue largement à l'imperméabilisation et à la conservation des mortiers est celui de leur carbonatation. Malheureusement la carbonatation par l'air ne se produit que très lentement et n'est que très superficielle.

On peut dire pourtant que la couche carbonatée ainsi formée à la longue devient une excellente protection contre les influences extérieures. Mais la chaux hydratée, formée au cours du durcissement, reste à l'intérieur, dans la masse même des mortiers, la plus grande menace contre leur stabilité et leur durée. C'est en effet un composé soluble, par conséquent soumis à l'action des eaux. On peut mettre sa présence dans les ciments durcis en pleine évidence, en traitant une section fraîche de ceux-ci par certains réactifs, tels que le bichlorure de mercure, l'acétate de cuivre, la phénolphtaléine, qui, au contact de la chaux libre, donnent des colorations très vives et nettes. Les parties carbonatées restent incolores. On cherche à utiliser le phénomène de carbonatation pour rendre les ciments plus résistants aux actions décomposantes, et cela, en les carbonatant dans la masse même. Jusqu'ici, on n'est pas encore arrivé à des résultats vraiment pratiques.

VIII. — Essais de laboratoire.

Les essais auxquels on soumet généralement les ciments sont les suivants :

Détermination du poids spécifique.
— de la finesse de mouture.
— de la densité apparente.
Essais de stabilité de volume à l'eau chaude.
— prise.
— résistance à la traction et à la compression.

Poids spécifique. — Le poids spécifique est réellement une qualité propre de la matière, mais outre qu'entre les diverses compositions de ciment le poids spécifique varie très peu, que, même avec la chaux hydraulique, il ne s'abaisse pas au-dessous de 2,80 et qu'il ne monte, avec les ciments artificiels, qu'à 3,10, il offre le très grand inconvénient d'être d'une détermination très délicate. Il est très difficile de mesurer la densité d'une poudre et la température doit être maintenue bien constante durant toute l'opération, et à 15° C. C'est donc avec raison que le poids spécifique a disparu des cahiers des charges français.

Finesse. — De la finesse, rien à dire, si ce n'est qu'elle peut donner des indications tout à fait erronées, car rien n'est plus facile que de composer artificiellement des ciments ayant une finesse déterminée. Le cahier des charges n° 1 de l'Administration des Ponts et Chaussées exige pour les emplois à la mer un rejet de 40 0/0 sur la toile de 4.900 mailles (1).

Si l'on broie directement des roches à ce rejet, la fine poussière n'est pas fine et on n'obtient pas les résistances imposées.

Si, au contraire, on broie très finement du ciment et qu'on rajoute des rejets obtenus dans une autre mouture des mêmes roches, on obtient des résistances plus élevées que celles exigées parce qu'on a alors une poussière très fine et des grains inertes.

Densité apparente. — La densité apparente est également un essai qui doit disparaître des cahiers des charges. Elle est natu-

(1) La dernière circulaire ministérielle a ramené ce chiffre à 10 0/0.

rellement fonction du poids spécifique des poudres, mais elle est aussi fonction de leur finesse, de leur état physique, du tassement, etc...

Les chaux éteintes en fosses et celles éteintes à l'extincteur donnent par exemple des densités tout à fait différentes :

Chaux éteinte en fosses (moyenne de 78 essais).....	0,833
Chaux éteinte à l'extincteur —	0,907

Essais à l'eau chaude. — Les essais à l'eau chaude se font au moyen des cylindres Le Chatelier bien connus, mais on serait bien embarrassé dans une usine si l'on n'avait que ce procédé pour diriger une fabrication. On aurait des résultats au plus tôt trente heures après le prélèvement des échantillons. Aussi emploie-t-on plutôt des pastilles que l'on expose à la vapeur d'eau. L'augmentation de diamètre au bout de deux heures donne la mesure du gonflement du produit. On peut même avoir ce résultat un quart d'heure après le prélèvement en mettant les pastilles dans la vapeur d'eau sous pression. Il est alors possible de suivre et de corriger une fabrication.

Les pastilles donnent peut-être une idée plus vraie du gonflement du produit, car l'influence de la résistance propre du produit à vingt-quatre heures est éliminée.

Le gonflement d'un cylindre mesure la différence entre l'effort d'extension et l'effort de résistance. C'est ainsi qu'avec des produits à résistances initiales élevées, on peut avoir des pastilles donnant de forts gonflements (4 0/0), tandis que les cylindres n'en indiquent que de faibles (4 à 5 millimètres), alors que théoriquement, étant donnée la longueur des antennes, un écartement de 10 millimètres ne correspond qu'à un gonflement de 1 0/0.

Essai de prise. — Il n'a d'intérêt que pour la mesure du début de la prise. La fin de la prise est toujours difficile à constater et n'indique, en somme, qu'une mesure du durcissement du produit. Ce durcissement est continu depuis le début de la prise.

Un nouveau procédé, présenté au dernier Congrès, basé sur l'enfoncement d'une bille, comme la méthode de Brinell pour la métallurgie, a des chances de remplacer l'essai à l'aiguille de Vicat.

Essai de résistances. — On tend à remplacer les essais à la traction à l'appareil Michaëlis par des essais sur des prismes en

béton, à moment constant, suivant la méthode de M. Feret. On n'aurait ainsi qu'un seul appareil pour mesurer la résistance et l'adhérence.

Les essais à la compression se font à la machine Amsler-Lafont. Cette machine ne donne que des résultats comparatifs, car, en pratique, on ne fait jamais l'opération préalable et délicate du tarage. Cette opération du tarage se fait soit à l'aide de crushers, soit en mesurant la flèche de morceaux d'acier dont le coefficient d'élasticité est bien connu exactement.

Il reste à voir quelle peut être la valeur de ces essais.

On peut avouer qu'elle est très faible.

Lorsqu'on met, l'un à côté de l'autre, deux gâcheurs travaillant la même matière, instinctivement ils s'imitent, se surveillent, gâchent régulièrement et les résultats sont satisfaisants. Mais lorsque deux gâcheurs différents ou le même gâcheur travaillent le même produit conservé dans des caisses soudées, à des dates différentes, les résultats sont moins satisfaisants, et les différences sur les résultats atteignent 25 0/0.

Enfin, si l'on compare les résultats de deux laboratoires éloignés, en ayant soin d'homogénéiser les produits au préalable et de les conserver dans des caisses zinguées, de les essayer le même jour, en un mot en prenant toutes les précautions possibles, les résultats deviennent navrants. Voici d'ailleurs quelques chiffres à l'appui :

1° Essais entre deux gâcheurs appartenant à deux laboratoires différents et travaillant côte à côte.

	CHIFFRE AYANT DONNÉ LE PLUS GRAND ÉCART		ÉCART 0/0 PAR RAPPORT à la moyenne
	1er Gâcheur	2e Gâcheur	
1re Série de 13 essais..........	19,33	16,83	14,22

2° Essais entre deux gâcheurs d'un même laboratoire gâchant le même échantillon à des jours différents.

	CHIFFRES AYANT DONNÉ LES PLUS GRANDS ÉCARTS		ÉCART 0/0 PAR RAPPORT
	1er Gâcheur	2e Gâcheur	à la moyenne
Sur une série de 63 essais......	18,0	14,75	19,85
	21,12	16,12	28,85
	9,25	7,50	20,90
	18,25	16,75	21,50
	5,12	4,00	24,56

3° Essais entre deux laboratoires différents mais sur mêmes échantillons bien homogénéisés.

	CHIFFRES AYANT DONNÉ LES PLUS GRANDS ÉCARTS		ÉCART 0/0 PAR RAPPORT
	1er Laboratoire	2e Laboratoire	à la moyenne
1re Série de 14 essais.........	11,0	5,50	66,66
2e Série de 9 essais............	6,50	3,70	54,90

Ce n'est pas encourageant et il y a encore beaucoup à faire pour améliorer la précision des essais des liants hydrauliques.

Le Société Pavin de Lafarge a envoyé des gâcheurs dans les quatre laboratoires officiels : Ponts et Chaussées, à Paris ; Arts et Métiers, à Paris ; Ponts et Chaussées, à Boulogne-sur-Mer ; Génie, à Boulogne, pour faire des essais de comparaison.

Les résultats ont été examinés et il semble bien que la concordance est suffisante quand les gâcheurs s'appliquent. On est donc, somme toute, un peu à la merci de l'homme qui gâche les briquettes et qui peut, par des petites variations imperceptibles de main-d'œuvre, amener des écarts de résistance assez grands.

Les Allemands viennent d'adopter le gâchage à la machine à broyer le mortier de Martens, suivi d'un tassement régulier à la machine à marteau du même constructeur. Ils tendent aussi à remplacer les essais de résistances à la traction par ceux de résistances à la compression sur des cubes de mortier.

CONFÉRENCE FAITE LE 26 JUIN 1912

aux Élèves de l'École d'Application de l'Artillerie et du Génie de Fontainebleau.

Nous allons, si vous le voulez bien, refaire ensemble par la pensée la visite des usines que vous venez de parcourir, un peu rapidement peut-être, et j'en profiterai pour vous donner, à chaque pas de notre course fictive, les explications nécessaires à la complète compréhension de ce que vous avez vu.

Nous nous arrêterons ainsi à l'extraction de la pierre, à sa cuisson, à son extinction. Je devrais ensuite vous parler des soins à employer pour fabriquer de bons mortiers.

Mais ces soins vous les connaissez et je me contenterai d'attirer votre attention sur certains défauts des mortiers et les moyens connus actuellement d'y remédier.

Il ne sera pas inutile enfin de terminer en vous disant quelques mots sur les essais de laboratoire.

I. — Et d'abord, vous avez vu, sur la carrière, extraire des pierres qui, après séparation de la terre qui les enrobait et du menu gravier, étaient mises dans les fours.

Qu'est-ce donc que ces pierres? Simplement un mélange très intime de quartz très fin et de carbonate de chaux. Depuis Vicat, tout le monde sait que les produits hydrauliques sont obtenus par la cuisson de calcaires à résidu argileux. Or, l'argile est un mélange d'un silicate bien déterminé, la kaolinite ($2SiO^2,Al^2O^3,2H^2O$), avec du quartz et des débris de feldspath, rarement du mica.

La particularité des calcaires de Lafarge est que l'argile se réduit presque exclusivement à du quartz, puisque la teneur en kaolinite ne dépasse jamais 25 0/0 du poids total de l'argile.

Ce manque d'alumine, s'il entraîne quelques inconvénients pour la fabrication des produits, n'offre au contraire que des avantages pour leur qualité.

Mais ce mélange intime est-il homogène? Comment ne le penserait-on pas si l'on considère que les analyses des produits de Lafarge faites en 1855 par Rivot, sont les mêmes que celles que l'on obtient aujourd'hui et comment, l'étant, peut-on expliquer que les pierres peuvent donner après cuisson des produits (chaux et ciments) qui, si voisins qu'ils soient, sont cependant différents.

C'est qu'il faut distinguer dans une carrière deux sortes d'homogénéité :

a) L'homogénéité d'ensemble que décèle l'analyse ;

b) L'homogénéité de répartition intime de l'argile et du carbonate de chaux.

L'étude de cette homogénéité de répartition est une de celles qui a le plus retenu l'attention des ingénieurs de Lafarge.

Déjà en 1897, en prenant possession de mon poste, j'avais trouvé ici, installé par mes prédécesseurs, un procédé d'attaque de la pierre par l'acide chlorhydrique dilué qui mettait en évidence les points les plus siliceux en les laissant subsister à l'état de sommets, tandis que les points plus calcaires, davantage creusés, apparaissaient comme des vallées.

M. Leduc a appliqué ce procédé à de nombreux calcaires et a rendu compte de la méthode dans le *Bulletin des Arts et Métiers*.

Il semble qu'on puisse plus facilement encore mettre en évidence la répartition de l'argile en se basant sur le fait découvert par M. Grandjean (professeur à l'École des Mines de Paris), que le



Fig. 32.

quartz fin et l'argile fixent certaines couleurs qui, au contraire, ne demeurent pas sur le carbonate de chaux pur cristallisé.

Les figures 32, 33, 34 et 35 sont des photographies de calcaires prises d'après les deux méthodes, elles vous donneront une idée très nette de la diversité de la répartition du résidu dans les calcaires.

II. — Ces détails étaient nécessaires pour vous faire com-

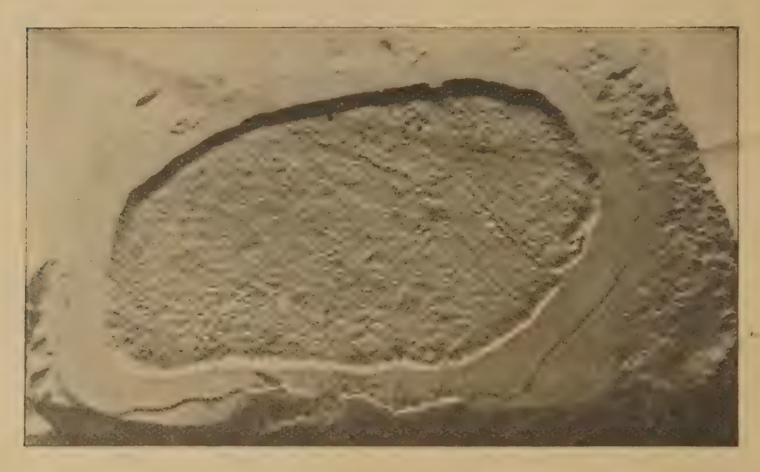


Fig. 33.

prendre qu'une carrière d'une telle homogénéité qu'à cinquante-

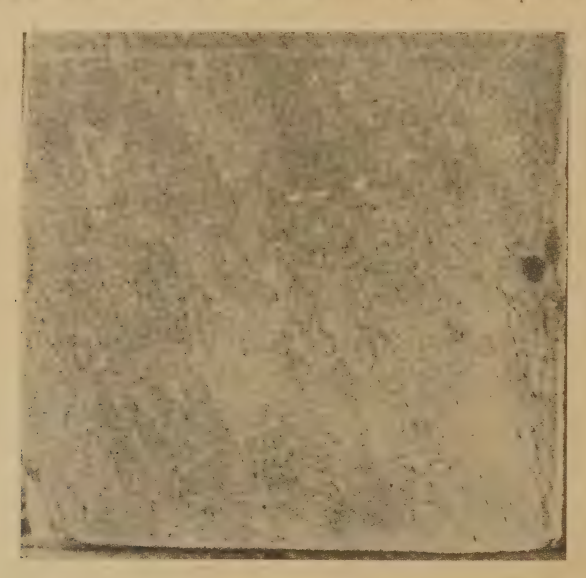


Fig. 34.

cinq ans de distance elle fournit des produits d'analyse constante, peut donner à la sortie des fours des produits différents.

Vous allez voir d'ailleurs en quoi consiste cette différence :

Vous avez remarqué à la sortie des fours :

a) De la poussière ;

b) Des roches ou des morceaux de toutes grosseurs.

Examinons chacun de ces produits :

a) La poussière gâchée avec de l'eau ne chauffe pas et ne fait pas prise. Son analyse indique que c'est un silicate dicalcique à peu près pur. Elle s'est formée aux environs de 350° par transformation allotropique.

Ce silicate dicalcique est l'un des corps les mieux étudiés parmi

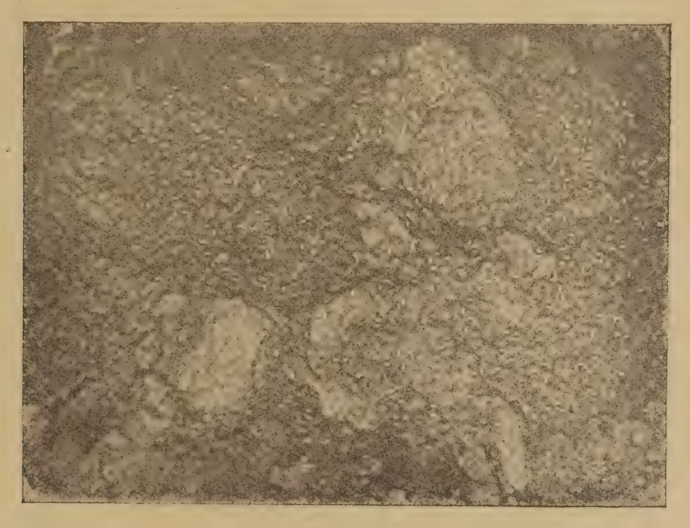


Fig. 35.

les constituants des chaux et ciments. Il jouit d'assez curieuses propriétés, car il se présente sous trois formes allotropiques α, β, γ stables au-dessus de 1.400° ; entre 1.400° et 600°, et en dessous de 600°.

Les deux formes α, β ont une densité de 3,27 et 3,28, la forme γ une densité de 3,14. C'est ce qui explique la pulvérisation avec augmentation de volume qui se produit au refroidissement. La trempe aux environs de 1.400° maintient à froid la forme α.

Sous la forme γ le silicate est absolument inerte, il est seulement décomposable à la longue par l'acide carbonique humide.

Sous la forme α maintenue par trempe à 1.400°, il paraît également non hydraulique, quoique le contraire ait été affirmé et que la question soit encore controversée.

b) Les morceaux de toutes grosseurs qu'on trouve au sortir du four réagissent au contraire vivement au contact de l'eau en se pulvérisant partiellement avec élévation de température. Si, lorsque la réaction est complètement terminée, on sépare par blutage les poudres fines des morceaux qui ont résisté à la pulvérisation et qu'on fasse l'analyse, on trouve les résultats moyens suivants :

	Poudre (1)	Morceaux (2)
Silice	16	23
Alumine et fer	3	5
Chaux	69	66
Divers (MgO, SO^3, CO^2, H^2O des silicates)	4	6
H^2O fixé sur CaO	8	»
	100	100

On remarque de suite que si on défalque de l'analyse (1) les 24 0/0 de chaux libre combinés aux 8 0/0 de H^2O sous forme de Ca (OH^2) le rapport

$$\frac{SiO^2}{CaO} = \frac{16}{45}$$

de la poudre est très voisin du rapport

$$\frac{SiO^2}{CaO} = \frac{23}{66}$$

des morceaux (2). On en conclut que la poudre obtenue par extinction est un mélange de $Ca(OH)^2$ et de grains très fins de la même matière que celle qui compose les morceaux. La chaux intimement mélangée aux silicates formés en a désagrégé une certaine quantité sous la forme d'une poudre très fine qui s'est mélangée à la chaux vive pendant l'opération de l'extinction.

Cette poudre, provenant des morceaux, se mélange naturellement, pendant la fabrication aux poussières bicalciques dont nous avons constaté la présence pour donner la chaux de Lafarge à 25 0/0 de silice que vous connaissez.

Les morceaux, restés intacts, broyés, donnent, eux, le ciment de Lafarge.

Les rapports

$$\frac{SiO^2}{CaO} = \frac{16}{45} \quad \text{et} \quad \frac{SiO^2}{CaO} = \frac{23}{66}$$

que nous avons trouvés plus haut sont sensiblement égaux au rapport

$$\frac{3CaO}{SiO^2} = 2,80$$

il y a donc lieu d'admettre, et les travaux micrographiques de M. H. Le Chatelier ont confirmé cette hypothèse, que l'élément constitutif essentiel des produits de Lafarge est le silicate tricalcique.

A vrai dire, on se demande aujourd'hui si le silicate tricalcique existe bien à l'état de corps défini ou si le corps obtenu est simplement une solution solide de chaux dans un silicate non encore déterminé ($SiO^2,2CaO$ ou peut-être $SiO^2,2,5CaO$).

La faculté qu'on a d'obtenir de bons ciments avec des produits surdosés en chaux mais cuits longtemps nous fait pencher vers l'hypothèse de la solution solide, mais une telle solution, en tout semblable à un alliage, constitue véritablement un produit nouveau ayant des propriétés spéciales et particulières et nous n'avons pas à nous arrêter sur ces détails théoriques.

Nous raisonnerons donc comme si le silicate tricalcique existait.

Ce silicate (ou la solution solide qui le remplace) est donc l'élément essentiel du durcissement de nos produits comme d'ailleurs de la plupart des produits hydrauliques. Il existe à l'état presque pur dans nos ciments et en mélange dans nos chaux avec des poussières lourdes inertes d'une part et de la chaux grasse d'autre part.

Nous pouvons, après ces quelques explications, représenter, par le schéma suivant, la fabrication et la constitution de nos produits.

Au sortir du four :

A	B	
Poussières lourdes de SiO^2, $2CaO$ 30 0/0 de SiO^2	Roches ou morceaux qui donnent après extinction	
	C	D
A + C mélangés donnent la chaux marchande à 23 0/0 de SiO^2	Une poudre mélangée de silicate tricalcique et de $Ca(OH)^2$ à 16 0/0 de SiO^2	Des morceaux de silicate tricalcique qui, triturés, donnent le ciment

Il n'y a donc, en fait, entre la chaux hydraulique et le ciment, qu'une différence de plus ou de moins. La chaux hydraulique est un ciment amaigri. La chaux grasse qu'elle contient lui donne cette plasticité qui la fait préférer, par les maçons, et permet de l'employer à des dosages relativement faibles, tout en conservant des mortiers maniables.

En Allemagne comme en Amérique, où la chaux hydraulique n'existe pas, tous les ouvrages techniques conseillent de mélanger aux ciments de la bonne chaux grasse en poudre. Ce serait reproduire artificiellement la chaux hydraulique naturelle. Mais la chaux

grasse est difficile à se procurer et souvent dangereuse, parce qu'incomplètement éteinte, aussi le conseil ci-dessus n'est-il pas toujours excellent. Je ne l'ai noté au passage que pour vous montrer les avantages de la chaux hydraulique qui est, dans la plupart des cas, le vrai matériau du constructeur.

Si d'autre part, on augmente, par une cuisson appropriée, comme celle que vous avez vue aux fours à gaz, dans le mélange qui constitue la chaux hydraulique, la proportion de silicate tricalcique et qu'on diminue la proportion de silicate bicalcique, on arrive à obtenir des chaux telles que nos *chaux maritimes* qui, tout en conservant les avantages de la plasticité des chaux des fours ordinaires, ont des résistances de ciment.

J'ai la conviction que dans beaucoup de cas, de pareils produits remplaceront les ciments artificiels, même pour les constructions en béton armé, comme l'ont montré les expériences que nous avons fait faire au laboratoire des Arts et Métiers.

III. — Nous venons de passer en revue la carrière et les fours. Je n'ai plus maintenant pour en finir avec la fabrication qu'un mot à vous dire sur les extinctions, car la chimie n'a rien à voir dans l'opération mécanique du broyage.

Vous avez pu, au cours de cette visite ou de notre conférence, vous demander comment des produits qui font prise au contact de l'eau pouvaient être mis au moment de l'extinction, au contact de l'eau sans en souffrir.

Cela tient à ce que les produits hydrauliques ne sont pas décomposés par la vapeur d'eau au-dessus de 140° s'ils sont alumineux, au-dessus de 120° s'ils sont uniquement siliceux ([1]).

L'élévation de la température qui se produit pendant l'extinction les met donc à l'abri des atteintes néfastes de l'eau. A vrai dire, dans les grands tas d'extinction, une partie de la vapeur d'eau produite va se condenser dans les parties froides des tas déjà éteints et décompose les silicates aux dépens des résistances. Aussi a-t-on substitué aux anciens tas relevés à la pelle les fosses où les produits conservent beaucoup plus longtemps leur chaleur.

D'autre part, si on a affaire à des produits délicats comme ceux des fours à gaz, on peut procéder à l'extinction au-dessus de 120°

([1]) Cf. communication de M. Bied au VIe Congrès de l'A. I. E. M., à New-York, XVIII, sur divers phénomènes chimiques rencontrés au cours d'études industrielles.

dans de longs cylindres calorifugés. On peut de même éteindre les poudres de ciment moulu dans des cylindres chauffés dans un serpentin de vapeur composé de tubes assemblés par la soudure autogène.

Vous avez vu fonctionner ces grands tubes. A notre usine de Vitry, il en existe un de $3^{m},50$ de diamètre et de 15 mètres de longueur.

IV. — Une fois moulus et livrés en sac (dans un avenir prochain toutes les chaux seront moulues) les produits hydrauliques servent à fabriquer des mortiers qui durcissent sous l'eau.

Le phénomène du durcissement dont la prise n'est que le début, consiste essentiellement en mise en liberté de chaux vive qui s'éteint avec production aux dépens du silicate tricalcique d'un silicate monocalcique suivant la réaction :

$$SiO^2 3CaO + Aq = SiO^2 CaO + 2Ca(OH)^2 + Aq.$$

Cette explication du durcissement, due à M. Le Chatelier (et qui est de beaucoup la plus probable), est actuellement combattue par les Allemands, qui affirment qu'au lieu de silicate monocalcique il se forme un colloïde de silice gélatineuse, qui durcit en enrobant les cristaux de chaux hydratée.

Il y a un fait certain qu'il ne faut pas oublier, c'est que la décomposition ci-dessus signalée ne se fait que sur une petite partie du produit. Le tiers ou la moitié du ciment entre seulement en réaction. On le prouve facilement, en dosant après un temps déterminé la quantité d'eau fixée sur la chaux.

D'autre part, des briquettes de ciment pur, restées trois ou six mois sous l'eau, séchées et pulvérisées, donnent encore un produit hydraulique qui fait prise et durcit, quoique plus lentement.

Pour avoir le maximum de grains entrant en réaction, il y a donc un intérêt considérable à faire des ciments et des chaux de la finesse la plus grande possible et c'est pourquoi le broyage des chaux deviendra sous peu général.

Il y aurait encore beaucoup de choses à vous dire sur la prise des aluminates dont l'un durcit comme le plâtre simplement en s'hydratant, mais la question est trop spéciale pour que je m'y attarde et je passe à l'emploi des ciments.

V. — L'importance de la nature du sable pour la qualité des

mortiers, les meilleures conditions de fabrication et d'emploi de ceux-ci ont été déterminées d'une façon magistrale par M. Feret (directeur du Laboratoire des Ponts et Chaussées, à Boulogne-sur-Mer). Ses conclusions font actuellement partie de tous les cours de construction et je n'ai pas besoin de m'arrêter sur cette question.

Mais il y a certains inconvénients des mortiers qu'on peut chercher à éviter, et certaines propriétés spéciales qu'on peut chercher à réaliser dans des cas particuliers, et je pense pouvoir vous donner sur ce sujet quelques renseignements inédits et utiles.

Parlons d'abord du *retrait* des mortiers. Tout le monde connaît ces fendillements si désagréables à l'œil, fendillements qui malheureusement deviennent souvent des fentes — qui se produisent sur les carreaux, sur les pierres artificielles, sur les enduits, sur les dallages.

Ces fendillements sont dus à un retrait des mortiers — retraît important qui peut atteindre 1 millimètre par mètre si le dosage est élevé, retrait variable suivant l'état hygrométrique de l'atmosphère, retrait qui met des années à se produire et qui ne parait même pas tendre vers une valeur absolue et constante.

Y a-t-il un moyen d'éviter ce retrait? Complètement, non, mais on peut certainement prendre quelques précautions qui peuvent le diminuer considérablement. Ces précautions sont les suivantes :

a) Employer les dosages les plus faibles compatibles avec l'exécution de l'ouvrage — plus le mortier est riche, plus le retrait est important.

b) Employer le mortier le plus sec possible, ne jamais faire d'enduits liquides à la truelle, mais des enduits posés à la grande taloche.

c) Faire les enduits ou les dallages par couches de faible épaisseur — une couche n'étant appliquée que quand la précédente commence à durcir — et aussi par petites surfaces séparées par des joints profonds. Ces joints profonds donneront lieu à une grosse fente localisée au fond du joint et peu visible.

d) Gâcher les mortiers avec une solution de 5 à 10 0/0 de savon blanc de Marseille. La couleur du mortier n'est pas changée, la tendance au fendillement très diminuée, mais très diminuées aussi les résistances initiales qui ne redeviennent normales qu'à quatre-vingt-quatre jours ou à six mois.

On peut d'ailleurs prendre comme règle générale que toute addition ou tout procédé qui active la prise augmente les fendillements, tout procédé qui la ralentit diminue aussi les fendillements.

On peut aussi dans certains cas, rechercher une *imperméabilité spéciale.* Il semble bien que le meilleur moyen de l'obtenir soit de forcer les dosages, mais il est certains cas où l'augmentation de dosage est impossible ou onéreuse.

Dans ces cas, nous recommanderons sans hésiter le gâchage à l'eau savonneuse (dissolution contenant 15 à 20 0/0 de savon de Marseille ou de savon noir, au cas où la couleur importe peu) ou l'addition au mortier d'huile minérale.

Cette dernière addition se fait très bien en gâchant le mortier comme à l'ordinaire et en ajoutant ensuite au mortier gâché l'huile minérale petit à petit et dans les proportions de 10 à 15 0/0 du poids du ciment entrant dans le mortier ou dans le béton.

L'imperméabilité est considérablement augmentée. Mais il ne faut pas perdre de vue que les résistances initiales des mortiers ainsi obtenus étant grandement diminuées, il ne faut mettre lesdits mortiers en charge qu'avec précaution et après un long temps de durcissement. Aussi si le procédé est bon pour des réservoirs en béton ou des murs dont on peut retarder la mise en eau, il ne serait pas à conseiller pour une défense contre une inondation ou une venue d'eau à moins de le faire concorder avec un très fort dosage d'un excellent ciment, ce qui permettrait aux résistances initiales de rester suffisantes malgré les additions d'huile ou de savon.

Enfin, il me faut parler des *décompositions.*

L'ennemi des mortiers, c'est l'acide sulfurique sous forme de sulfates qui donnent avec la chaux des produits gonflants.

Il y a deux modes caractéristiques de décomposition.

Dans l'un, le sulfate de chaux formé immédiatement au contact de la chaux par les sulfates alcalins, se combine à l'alumine pour former le sulfo-aluminate de Candlot :

$$Al^2O^3\,3CaO, \qquad 3SO^3CaO\;30H^2O,$$

qui, cristallisé avec un grand nombre de molécules d'eau, gonfle.

Dans ce cas, le mortier éclate véritablement et j'ai pu dire en

1902 que les culées de certains ponts du Sud-Algérien paraissaient avoir subi une dislocation consécutive à l'explosion d'une faible charge de poudre.

Dans l'autre cas, les sulfates, lorsqu'il s'agit de mortiers siliceux ou réfractaires à la décomposition, se déposent dans les pores du mortier qui se met en bouillie ou redurcit suivant qu'il est humide ou sec. Dans ce cas, il n'y a pas de phénomènes chimiques, mais un simple phénomène physique qui prend une singulière intensité lorsqu'on a affaire à des mortiers successivement à sec ou immergés, et surtout à des eaux chargées de sulfates de soude, à cause des phénomènes d'efflervescence auxquels ce sel donne lieu.

Il faut aussi signaler — au moins en ce qui concerne les mortiers non soumis à une filtration et complètement immergés — un phénomène particulièrement intéressant. La décomposition est toujours précédée de la diffusion de la chaux de l'intérieur à l'extérieur du mortier — diffusion qui se fait lentement si les matériaux sont bons et le mortier bien fait. La décomposition proprement dite ne commence que lorsque le transport de la chaux de l'intérieur à l'extérieur cessant, les sels extérieurs peuvent à leur tour pénétrer dans le mortier et y pénétrer d'autant plus facilement qu'il est devenu plus poreux.

Ces faits ont été mis en lumière par M. Maynard, alors qu'il était directeur du Laboratoire de la Rochelle. J'ai pu en vérifier l'exactitude, particulièrement sur des échantillons qui m'ont été envoyés des formes du radoub de l'arsenal de Dakar.

Lorsque, par suite d'économie exagérée, le constructeur emploie du mauvais sable ou du béton mal fait, on s'aperçoit de cet exode de la chaux, de l'intérieur à l'extérieur, et l'on peut parer au danger qui menace, en faisant en temps utile, des injections de ciment.

Y a-t-il des ciments indécomposables? Chimiquement, oui, avec l'addition de pouzzolanes.

Vitruve disait déjà :

Est etiam genus pulveris quod efficit naturaliter res mirandas.

Cette poudre qui fait des choses merveilleuses, c'est la pouzzolane si connue des anciens, car la nature l'a libéralement prodiguée en tous points de l'Italie et des îles de l'Archipel, mais notamment sur les flancs du Vésuve et à Santorin.

Dans ces poudres pouzzolaniques, la silice est à un état chimique tel qu'en présence de l'eau elle s'unit à la chaux pour former un silicate monocalcique très stable. On comprend donc que la chaux, en présence de cette poudre pleine d'affinité pour elle, ne se mette en liberté, lors de la réaction de la prise, que pour se recombiner immédiatement, et qu'elle ne puisse ainsi ni diffuser au dehors, ni donner lieu à une attaque quelconque par les sels extérieurs.

Mais il y a plus : non seulement il existe des pouzzolanes naturelles, mais on peut en fabriquer d'artificielles. La première en importance est le laitier de hauts fourneaux qui donne, par simple mélange avec la chaux, lorsqu'il a la composition convenable et qu'il est bien traité, un ciment qui a fait ses preuves de tous cotés et dont le champ d'emploi augmente chaque jour : le ciment de laitier.

La seconde, que, après Vicat, j'ai spécialement étudiée, est l'argile déshydratée. Vous savez que toutes les argiles se composent de quartz, de feldspath et de kaolinite ($2SiO^2,Al^2O^3,2H^2O$). Portée à 800°, cette kaolinite perd son eau de constitution, devient facilement attaquable par l'acide chlorhydrique dilué et devient une excellente pouzzolane.

Malheureusement on est très limité comme température de déshydratation, il ne faut ni rester en dessous du point voulu, ni surtout le dépasser, sous peine d'insuccès.

C'est cette argile déshydratée qui est la base du ciment indécomposable, connu commercialement sous le nom de ciment *indécomposable* Pavin de Lafarge. On peut affirmer que pratiquement ce ciment est chimiquement indécomposable. Malheureusement toute médaille a son revers. D'abord la présence de l'argile déshydratée, matière poreuse, le rend assez facilement éventable. Il faut donc l'employer peu après la fabrication. Ensuite la combinaison de la silice et de la chaux ne se faisant qu'en présence de l'eau, il faut pour ce ciment, plus que pour tous les autres, éviter une dessiccation rapide.

Enfin le danger de décomposition physique par dépôt de sels n'est pas évité et on ne doit pas négliger la précaution de ne l'employer qu'à de forts dosages.

Je suis persuadé que ce ciment, pour ces raisons, cédera un jour la place à l'aluminate monocalcique fondu.

VI. — Les produits finis, il faut les vendre et les faire recevoir par les administrations et si dans le cours de cette note il vous est apparu que la fabrication des produits hydrauliques entre à peine dans la voie scientifique et que nos connaissances sont sur beaucoup de points encore très incomplètes, j'estime que c'est peut-être encore pour les méthodes d'essais que nous sommes le plus en retard, car la concordance entre deux laboratoires ne se fait guère qu'à 40 0/0 près.

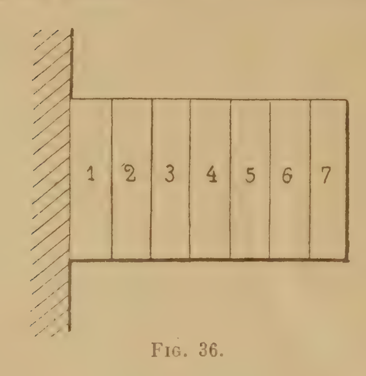


Fig. 36.

Autrefois, on jugeait de la valeur d'un ciment en plaçant successivement et verticalement contre un mur des briques (*fig.* 36) faites au moyen du ciment à essayer. Le nombre de briques qu'on pouvait ainsi placer était d'autant plus grand que le ciment était meilleur. A vrai dire, ce procédé avait l'inconvénient d'avantager les ciments à durcissement rapide. Il faisait intervenir en outre la résistance à l'adhérence plus que la résistance à l'écrasement.

Néanmoins, il peut servir encore quand on ne dispose pas d'autres méthodes et nous devons avouer que nous n'avons pas trouvé beaucoup mieux.

Quoique vous connaissiez bien les procédés d'essais, il sera utile de les passer en revue pour vous dire, en examinant chacun d'eux, les critiques qui leur sont faites et les recherches actuellement en cours.

1° L'*essai de densité* est très critiqué ; on fait remarquer que la densité apparente ne dépend que de l'état physique. En ce qui me concerne, je peux industriellement, en variant seulement le mode d'extinction employé, obtenir avec la même chaux la densité de 700 grammes ou celle de 900 grammes.

On demande donc sa suppression comme on demande aussi la suppression des essais de finesse, les bonnes résistances ne s'obtenant qu'avec la finesse.

2° L'*essai de prise* donne lieu à de nombreuses récriminations. Deux laboratoires n'estiment jamais de la même façon le moment où l'aiguille Vicat ne laisse que des traces appréciables sur l'éprouvette.

On cherche à le remplacer soit par l'écrasement de petits cylindres de 3 centimètres, soit par la mesure d'un nombre de dureté suivant le procédé de la bille de Brinell que M. Laborbe a le premier essayé d'adapter aux ciments.

3° Les *essais de résistance* en pâte pure paraissent ne plus avoir de défenseurs.

4° Les *essais de résistance* à la traction en mortier sont attaqués à cause de leur manque de précision, surtout d'un laboratoire à l'autre.

Une tendance générale se manifeste en faveur des essais à l'écrasement sur cylindres, beaucoup plus réguliers même que les écrasements sur cubes.

Mais on demande que les résistances à la traction à sept jours et à vingt-huit jours ne servent pas seulement à faire recevoir les ciments, mais bien plutôt à calculer les résistances à quatre-vingt-quatre jours.

Ce qu'on demande en effet à un liant hydraulique, c'est une résistance importante à quatre-vingt-quatre jours, avec une résistance suffisante à sept jours. La résistance à vingt-huit jours ne serait mesurée que pour calculer la résistance à quatre-vingt-quatre jours.

Cette dernière peut s'obtenir exactement pour les ciments et par défaut pour les chaux au moyen de la formule :

$$R84 - R28 = R28 - R7$$

ou

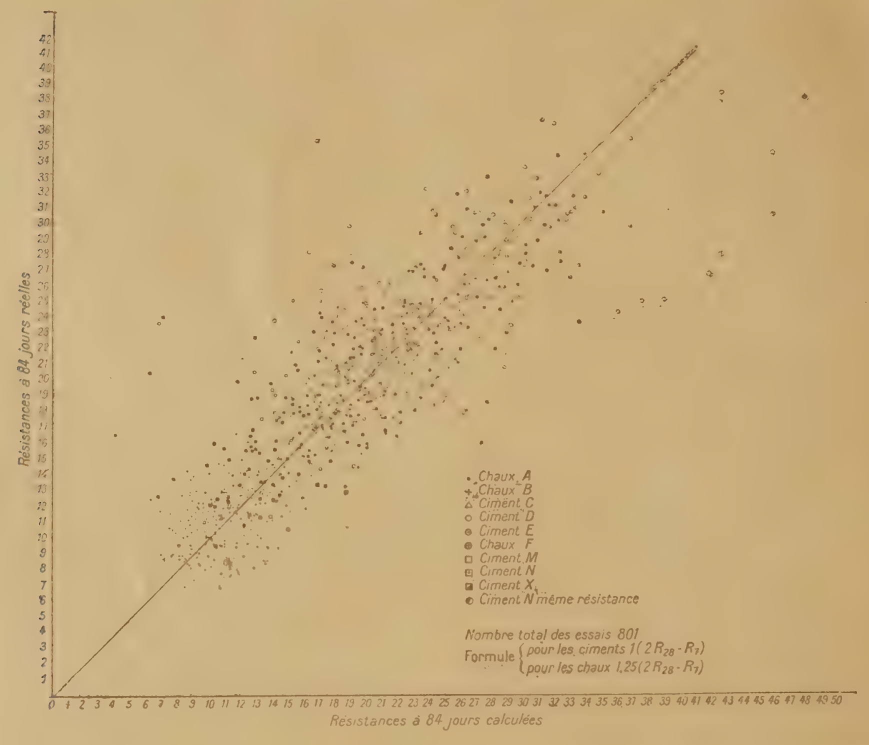
$$R84 = 2R28 - R7$$

qui suppose que la courbe d'accroissement des résistances est une branche d'hyperbole.

Sur le graphique XXIII on a groupé 800 points en prenant pour coordonnées les résistances calculées et les résistances réelles. Le groupement autour de la bissectrice est aussi parfait que le permet le peu de précision des essais à la traction.

Je pense que les cahiers des charges gagneraient à ne prescrire qu'une résistance à sept jours, qui pourrait être plus faible que la résistance actuellement demandée, et il ne s'agirait que de s'assurer que le produit durcit assez vite pour ne pas retarder les travaux, et une résistance à quatre-vingt-quatre jours calculée d'après les résistances à sept jours et à vingt-huit jours. La formule ci-

dessus montre en effet qu'entre deux produits qui ont même résistance à vingt-huit jours, le meilleur est celui qui a la plus faible résistance à sept jours, et ce serait justement celui qui pourrait être refusé avec les conditions de réception actuelles.



Graphique XXIII.

5° Les *essais de déformation* à l'eau chaude sont acceptés en France sans observation. Ils viennent de donner lieu à d'importants travaux de M. Feret auxquels j'ai eu le plaisir de collaborer.

CONFÉRENCE FAITE LE 29 JUILLET 1913

aux Élèves de l'École Militaire du Génie de Versailles.

I. — J'aborderai, dans ma causerie, quelques points spéciaux de la fabrication des produits hydrauliques, sans très grand lien entre eux, mais qui offrent, séparément, pour vous, un certain intérêt. L'étude de l'un d'eux, au moins, soulèvera la grave ques-

tion des rapports des administrations, ou d'une façon générale, des clients avec les fabricants.

De même qu'il est de mode, aujourd'hui, d'exposer le point de vue bulgare, le point de vue turc, le point de vue grec ou le point de vue serbe, je me permettrai d'exposer devant vous, non pas le point de vue terre à terre des fabricants, mais avec le plus d'impartialité possible, le point de vue scientifique, celui auquel doivent se placer et les administrations et les fabricants soucieux de leur dignité et de leur réputation.

L'an dernier, pendant ma conférence, j'avais refait, par la pensée, avec vos camarades, la tournée des usines; je leur avais expliqué comment il se faisait que d'une même pierre on tirait, à la fois, de la *chaux* et du *ciment*. La *Revue du Génie militaire* ayant donné l'hospitalité à ma conférence, je ne reviendrai pas sur cette question. Je vous rappellerai seulement que c'est dans l'inégalité de répartition du résidu argileux dans la pierre qu'il faut chercher l'explication de ce phénomène. On recueille d'un côté de la chaux éteinte mélangée à des silicates inertes et à de fines particules du ciment, de l'autre le ciment.

Messieurs, ces deux noms de *chaux* et *ciments* ont pesé lourdement dans le passé et pèsent encore lourdement aujourd'hui sur l'industrie des produits hydrauliques. Quoiqu'ils s'appliquent à des matières fort peu différentes, ils ont été consacrés par les cahiers des charges des administrations et je ne vois pas un ingénieur des Ponts et Chaussées ou un chef du Génie autorisant, actuellement, malgré les expériences faites au laboratoire des Arts et Métiers qui la classent, pour cet emploi, comme l'égale des ciments Portland artificiels — autorisant, dis-je, l'emploi de notre *chaux maritime* sur des chantiers en béton armé.

J'entends encore un entrepreneur d'Algérie, décédé depuis, qui avait employé, avec succès, cette chaux maritime pour les planchers d'une maison lui appartenant, me dire :

« Si je pouvais, je l'emploierais dans tous mes travaux.

« Malheureusement, je ne peux pas faire venir des sacs de *chaux* sur des chantiers de *ciment*. — Pourquoi diable avez-vous appelé ce produit *chaux ?* »

D'autre part, M. Dyckerhoff, le célèbre fabricant allemand, pense que non seulement notre chaux maritime, mais même notre chaux

ordinaire moulue, type administrative, seraient acceptées en Allemagne comme portland.

Les exemples sont nombreux de l'influence néfaste qu'ont eu certains mots sur l'évolution des sciences. Je pense qu'on pourrait trouver facilement ici un exemple de leur mauvaise influence sur l'évolution d'une industrie.

II. — Vous venez, Messieurs, de parcourir une magnifique usine que vous avez certainement et, avec raison, admirée. Mais, j'ai honte de l'avouer, ce qui a le plus légitimement provoqué votre admiration, c'est une très belle application à notre industrie des progrès de l'industrie mécanique. Nous n'avons à vous montrer aucun progrès réel de l'industrie des produits hydrauliques. Nous ne sommes pas plus avancés qu'il y a quelques années sur la constitution intime du calcaire, sur celle des produits obtenus et sur les limites dans lesquelles cette constitution peut varier pour donner la gamme innombrable des liants hydrauliques.

En 1887, à quelques mois d'intervalle, paraissaient deux mémoires importants dans deux branches différentes de l'industrie. L'un, le mémoire de M. H. Le Chatelier sur la constitution intime des produits hydrauliques ; l'autre, celui d'Osmond, sur les points critiques de l'acier.

Comment se fait-il que le premier ait été à peu près sans influence sur le progrès de l'industrie des chaux et ciments, tandis que l'autre a été le point de départ d'une transformation complète de la métallurgie ? Il n'est peut-être pas inutile d'en rechercher les raisons.

Elles sont de plusieurs ordres. D'ordre intellectuel d'abord. Il ne faut pas oublier, en effet, que les maîtres de forges étaient, à cette époque, incontestablement mieux préparés à recevoir la bonne parole et à en profiter, que les fabricants de ciments.

Je me rappelle encore, car j'étais en ce moment jeune lieutenant d'artillerie dans une région industrielle, l'émotion véritable que produisit, dans les milieux qu'il pouvait intéresser, le mémoire d'Osmond. Pendant quelque temps, à peine les premières poignées de main échangées, on se demandait : « Avez-vous lu le mémoire d'Osmond ? » De partout, en effet, on cherchait l'explication de phénomènes restés obscurs et cette explication apparaissait soudain, comme le soleil des tropiques se lève brusquement et sans

aurore, remplaçant par son éblouissante lumière « l'obscure clarté qui tombe des étoiles ».

Je ne pense pas dire du mal des fabricants de ciments en affirmant que le mémoire de M. H. Le Chatelier ne leur a pas causé une émotion semblable.

Mais, s'ils étaient moins préparés à recevoir la bonne parole, ces industriels, il faut le dire à leur décharge, se trouvaient en face de problèmes beaucoup plus complexes que les métallurgistes et leur esprit scientifique était mis à une plus rude épreuve.

La base de l'esprit scientifique, vous le savez, c'est la foi absolue dans le déterminisme des phénomènes.

Soit un phénomène dont l'apparition dépend de plusieurs facteurs X, Y, Z, T, U, V; désignons sa valeur à un moment t_0 par la fonction F $(X_0, Y_0, Z_0, \ldots, V_0)$; toutes les fois qu'on donnera à X, Y, Z, ..., V, les mêmes valeurs $(X_0, Y_0, Z_0, \ldots, V_0)$, le phénomène se reproduira identique à ce qu'il était à l'instant t_0.

La science consiste dans la recherche des dépendances des phénomènes entre eux.

La méthode scientifique consiste à faire varier à la fois *une seule* des variables, X par exemple, et à voir ce que devient le phénomène étudié lorsqu'on donne à X les valeurs successives $X_0, X_1, X_2, \ldots, X_n$. On aura ainsi trouvé la forme de la fonction qui relie l'apparition du phénomène aux variables, et on pourra répéter celui-ci à volonté.

Cet esprit scientifique ne doit pas être cantonné au laboratoire. Il s'applique non seulement aux phénomènes physiques, mais aux phénomènes physiologiques et même sociaux, et je pense, comme mon maître Le Chatelier (*Pour la science*, volume sur Louis Olivier), que le jour où il aurait pénétré l'humanité, depuis l'école primaire, et la cuisine jusqu'aux législateurs « cela constituerait un progrès qui suffirait à transformer encore une fois le monde et augmenterait sa richesse à l'infini ».

Mais cet esprit scientifique est d'autant plus difficile à conserver que les phénomènes étudiés sont plus complexes, car il devient alors très difficile de ne faire varier qu'une seule des variables indépendantes, et si, en faisant varier X, on fait varier aussi Y sans le savoir, on peut attribuer à tort à X la modification du phénomène observé, tandis qu'elle sera due à la variation simultanée de X et de Y.

Si, ensuite, quand on procèdera à la vérification de son expérience, on fait sans s'en douter, varier Z avec X, on retrouvera une autre valeur du phénomène et alors, si on n'est pas muni d'une foi robuste dans le déterminisme on glisse au scepticisme et à l'empirisme du médecin qui n'ayant pas obtenu le même résultat avec le même remède chez deux malades différents, sourit ou hausse les épaules au lieu de se demander quelle variation du milieu cosmique a pu amener cette différence d'action.

Or, le nombre des variantes indépendantes dont dépend un phénomène est quelquefois très grand.

Taylor, dont le nom est actuellement sur toutes les bouches, en Amérique et en Europe, a mis vingt-cinq ans de sa vie et fait de grosses dépenses pour trouver les douze variables dont dépend le rendement d'une machine-outil : vitesse de coupe, forme de l'outil, etc., etc... Mais sans changer de machine ni de personnel, il a *quintuplé* le rendement de l'atelier qui lui était confié.

Or, sans avoir défini toutes les variables indépendantes qui agissent sur la fabrication des produits hydrauliques, on peut affirmer que leur nombre est infiniment supérieur à douze (nature de la pierre, grosseur de la pierre, nature du charbon, calibrage du charbon, proportion de cendres, résistance du four, dépression au sommet, etc...) On est donc bien en droit d'excuser les fabricants de ciment, moins bien préparés que les métallurgistes, nous l'avons vu, et placés en face de problèmes bien plus difficiles.

Mais, à ces raisons d'ordre intellectuel qui expliquent la stagnation de l'industrie des chaux et ciments, s'en ajoutent d'autres, d'ordre commercial et administratif.

D'abord, la découverte d'Osmond a *payé* de suite ; elle indiquait des faits précis facilement vérifiables. Les administrations de la guerre et de la marine avaient besoin de bons aciers, elles les ont réclamés, elles les ont payés des prix assez rémunérateurs pour permettre des dépenses. C'est ainsi qu'on m'a assuré que l'usine Saint-Jacques, à Montluçon, dépense annuellement 20.000 francs de fils de platine destinés aux couples thermo-électriques qui servent à la mesure des températures, et s'en trouve bien.

Hélas, la question ne se pose pas de la même façon pour les produits hydrauliques. Non seulement la tendance est au bon marché, mais les administrations elles-mêmes, en s'immisçant dans la

fabrication, en créant des classements arbitraires, en imposant des conditions de réception spéciales à chaque classement, sont venues — je m'excuse de ma hardiesse — *gêner* considérablement le développement de l'industrie des produits hydrauliques.

Est-ce que, il y a quelques années encore, dans les cahiers des charges des Ponts et Chaussées, la chaux n'était pas définie comme le produit obtenu par le blutage du tout-venant de l'extinction à la toile 40, le passage des résidus sous des meules, le reblutage du produit ainsi obtenu à la toile 50 et le mélange du deuxième tamisage au premier ? Et si, en améliorant la cuisson et l'extinction on pouvait obtenir une chaux et un ciment supérieurs par un tamisage à 80, l'administration venait mettre son holà.

Est-ce que, encore maintenant, le ciment Portland ne doit pas avoir une densité de 1.150 qui ne peut s'obtenir qu'avec des produits assez alumineux et une mouture grossière c'est-à-dire aux dépens des résistances ?

Est-ce que notre chaux maritime, obtenue simplement par une meilleure cuisson de notre pierre, n'a pas dû subir des essais assez prolongés avant d'être admise aux travaux en prise à la mer, comme si c'était un produit nouveau ?

Est-ce que, Messieurs, le cahier des charges du Génie n'exige pas encore le silotage des grappiers et la séparation de la chaux lourde alors que tout produit bien éteint peut être livré de suite ?

III. — C'est cette question de silotage, une de celles que j'ai accepté de traiter devant vous, qui est la cause de la digression que je viens de faire, car si le silotage peut être une nécessité dans de toutes petites installations, on peut affirmer que toute usine qui fabrique bien peut livrer ses produits avant tout silotage.

Les silos n'ont plus actuellement que deux buts : le premier, et le plus important, est d'assurer un volant de fabrication qui permet de faire face à des commandes urgentes et simultanées : le deuxième est d'opérer un certain mélange des produits. Les silos, en effet, se remplissent par couches horizontales, et, sans affirmer avec d'aucuns qu'ils se vident par couches verticales, il est certain qu'il se produit pendant la vidange de nombreux éboulements qui amènent un mélange des diverses couches.

Voyons donc comment le silotage a été autrefois considéré

comme si nécessaire, et pour cela rendons-nous compte de ce qui se passe dans l'extinction.

D'abord les données certaines. La chaux hydratée se dissocie exactement à 400°, par conséquent la chaux vive ne s'hydrate qu'au-dessous de cette température. Le maximum de facilité d'hydratation doit avoir lieu vers 200 ou 250°, sans que des expériences très précises aient été faites. Les silicates ne sont pas décomposés dans la vapeur d'eau sèche, au-dessus de 120°, les aluminates au-dessus de 150°. Au contraire, en dessous de ces températures, les silicates et les aluminates sont décomposés, donnant naissance à de la chaux vive qui s'hydrate, tandis que les silicates plus faciles formés s'hydratent aussi.

Certaines pierres vitrifiées, peu poreuses ou insuffisamment cuites, s'éteignent plus difficilement en contact avec la vapeur, c'est-à-dire qu'il faut relativement *longtemps* pour obtenir leur extinction, parce que la vapeur ne les pénètre pas. L'opération va beaucoup plus vite en les trempant dans l'eau et en les chauffant. Mais, si l'on triture toutes ces pierres, l'extinction à la vapeur se produit facilement parce que les grains de chaux vive sont mis, par la trituration, en contact facile avec la vapeur. D'une façon générale, les pierres bien cuites qui résistent à l'extinction donnent, par trituration et extinction successives, de très belles résistances de ciment.

Dès 1895, M. H. Le Chatelier a étudié ce qui se passait dans les tas d'extinction ; je vous renvoie à l'article qu'il a fait paraître, à cette époque, dans le *Bulletin de la Société d'Encouragement* et qui est très complet ; mais voici ce qu'il vous faut retenir :

1° Dans le mouillage de la chaux tous les morceaux ne sont pas mouillés, la température des morceaux mouillés s'élève rapidement et vaporise l'eau en excès, la chaleur de formation de $Ca(OH)^2$ étant telle que chaque morceau peut vaporiser une quantité d'eau égale à celle qu'il fixe.

2° Les morceaux non mouillés s'éteignent dans le courant de vapeur d'eau qui résulte de cette vaporisation ;

3° La vapeur en excès s'échappe dans l'atmosphère, ou va se condenser sur les parois des fosses, ou dans les parties froides des tas, hydratant dans ce cas les silicates des parties déjà éteintes.

Le blutage du produit obtenu donnera d'un côté des chaux en

poussières qui peuvent être bien éteintes, de l'autre des grappiers qui comprendront :

a) Des morceaux mal éteints provenant des morceaux mal mouillés (extinction dans la vapeur) ;

b) Des silicates inertes hydratés.

Ce sont ces grappiers qu'on soumettait autrefois au silotage.

Pendant le séjour en silos, les parties mal éteintes continuent leur extinction grâce à la vapeur d'eau fixée sur les silicates décomposés, la tension de dissociation de ceux-ci étant, à la température ordinaire, beaucoup plus grande que celle de la chaux, toute l'eau fixée sur les silicates se sépare d'eux, avec le temps, et vient se fixer sur la chaux.

Cette auto-extinction amène, généralement, une nouvelle pulvérisation partielle et la poudre obtenue porte le nom de *chaux lourde*.

Cette *chaux lourde* a été prise longtemps pour un mauvais produit pouvant occasionner des accidents. Il n'en est rien si, une fois moulue, elle est éteinte à la vapeur. Ses résistances sont alors celles du ciment.

Mais pourrait-on l'éteindre aussi, une fois moulue, par silotage?

L'apport de la vapeur d'eau de l'atmosphère dans un silo contenant des poudres moulues étant tout à fait nul, la condition *nécessaire* et *suffisante* pour que l'extinction se complète en silos est que le produit siloté contienne, fixée sur les silicates, une quantité d'eau égale à celle nécessaire à l'extinction de la chaux vive. Si cette condition n'est pas remplie, les produits mis en silos ne s'éteindront jamais.

Le silotage comporte donc une perte de temps et un *danger:* une perte de temps, car le transport de l'eau des silicates sur la chaux vive ne se fait que lentement en silos ; un *danger*, car il suffit, pour que l'extinction finale ne soit pas obtenue, que les produits silotés, ne contiennent pas, fixée sur leurs silicates acides, l'eau nécessaire à l'extinction de la chaux vive.

Aussi, à Lafarge et à Cruas, nous ne reposons plus nos grappiers. Nos silos ne sont que des magasins. Nous prenons nos grappiers absolument frais, mais, après trituration, ces grappiers sont passés, en poudre, dans un grand cylindre tournant comme ceux que vous avez vus, en contact avec de la vapeur au-dessus de 120°, et nous

sommes sûrs d'obtenir ainsi un produit absolument exempt de chaux vive qui peut être livré de suite.

En faisant la première extinction, au sortir du four, dans un cylindre tournant construit d'après les mêmes principes, on évite en plus, tout éventement pendant cette première extinction (fixation d'eau sur les silicates), puisque la température de l'enceinte est constamment au-dessus de 120° et c'est le procédé que nous avons adopté pour la fabrication de la chaux maritime.

De ces explications, vous garderez donc comme souvenir que le silotage est un procédé *empirique*, qui a encore sa raison d'être dans les petites installations, qui ne comportent pas de grands moyens mécaniques — mais qui n'a plus aucune raison d'être dans une fabrique moderne, où, comme je vous l'ai dit, les silos doivent être simplement réduits au rôle de magasins.

En tous cas l'administration, ayant entre les mains le moyen de s'assurer (essai H. Le Chatelier) qu'un produit est absolument exempt de chaux vive, seule chose qui lui importe, la liberté complète doit être laissée aux fabricants quant à leur mode d'opérer.

IV. — Je viens de protester contre les classements rigides imposés par les cahiers des charges. Ceux-ci doivent, à mon avis, ne contenir que des conditions de réception ; peu importe, en effet, au consommateur, le mode de fabrication, si les produits correspondent à ce qu'il désire. Mais, il est, au point de vue de la nature chimique des produits hydrauliques une distinction qui s'impose.

Une classe de produits hydrauliques est formée par des solutions solides ou des composés définis qui se décomposent au contact de l'eau en éléments chimiques plus simples, lesquels cristallisent en amenant le durcissement.

Une autre classe se compose simplement de mélanges de chaux et de pouzzolane.

J'ai rappelé l'an dernier, à vos camarades que les Romains employaient couramment, dans leurs constructions, des mélanges de chaux et de pouzzolane naturelle, et je leur ai signalé qu'il existait deux pouzzolanes artificielles : l'*argile déshydratée* et le *laitier de haut fourneau*. Je reviendrai tout à l'heure sur l'argile déshydratée et je vais vous parler maintenant du *laitier de haut fourneau.*

Les laitiers de haut fourneau ne sont autre chose que les scories obtenues lors de la fusion de la fonte.

Le lit de fusion, et, par conséquent, la nature de la scorie, varient suivant la nature du minerai traité et la marche du fourneau.

Mais, quelles que soient les conditions, on peut admettre qu'on produit à peu près une tonne de laitier par chaque tonne de fonte fabriquée. La quantité de laitier obtenue annuellement est donc considérable.

Un haut fourneau de 200 tonnes par jour en produit 70.000 tonnes par an, c'est-à-dire de quoi couvrir sur 7 mètres de hauteur un hectare de terrain. Aussi, de partout a-t-on cherché, depuis longtemps, à se débarrasser de ce résidu encombrant.

Dès le début on a essayé de concasser les laitiers et de les vendre soit pour l'empierrage de chaussées, soit pour la fabrication du béton.

On n'a pas tardé à s'apercevoir que certaines qualités de laitiers traités convenablement et employés comme sable, donnaient, avec de la chaux, des mortiers d'une très grande dureté. De là est née, il y a quelques trente ans, la fabrication des briques de laitier, puis, peu après celle du ciment de laitier.

Mais quelle que soit l'importance de la fabrication du ciment de laitier, on ne peut penser qu'elle épuisera jamais tout le laitier produit dans les hauts fournaux.

Nous verrons, d'ailleurs, qu'une partie seulement des laitiers est apte à cette fabrication.

Aussi, toutes les installations de haut fourneau doivent-elles prévoir de grands parcs pour la conservation de leur laitier. Les nouvelles usines de Caen pensent s'en servir pour le remblayage hydraulique des mines de fer qu'elles exploitent.

Bien entendu, et depuis déjà longtemps, on applique à peu près à tous les laitiers, quelle que soit leur nature, le procédé de la granulation qui consiste à faire tomber le laitier en fusion dans un courant d'eau froide. On obtient ainsi le laitier sous forme d'un sable un peu grossier qui est facilement maniable et transportable au parc.

La composition chimique des laitiers est excessivement variable. On peut citer des laitiers acides, comme ceux de la Suède et de la Saxe, qui ne contiennent presque pas d'alumine mais ont jusqu'à 50 et 60 0/0 de silice associée à 25 et 30 0/0 de chaux et de magnésie.

On trouve, au contraire, des laitiers très basiques qui ne contiennent pas plus de 25 0/0 de silice, avec 15 0/0 d'alumine et jusqu'à 55 0/0 de chaux.

Parmi ces laitiers, les seuls aptes à faire du ciment, sont ceux *qui se rapprochent* de la composition chimique suivante :

Silice	30-35 0/0
Alumine	15-25 0/0
Chaux	40-50 0/0

Si l'on considère que la formule $2SiO^2, Al^2O^3, CaO$ correspond à :

Silice	30 0/0
Alumine	25 0/0
Chaux	42 0/0

on peut dire, au moins comme moyen mnémotechnique, que les laitiers aptes à donner du ciment de laitier, doivent se rapprocher de la formule : $2SiO^2, Al^2O^3, 3CaO$, étant entendu qu'une partie de l'alumine peut être remplacée par de la silice et de la chaux.

Mais, il ne suffit pas que les laitiers aient une composition chimique convenable, il faut encore pour qu'ils puissent donner un bon ciment, que la granulation leur ait conservé à peu près complètement l'état vitreux dans lequel ils se trouvaient au moment de la fusion.

Lorsqu'on laisse refroidir les scories de haut fourneau, à l'air et doucement, il se forme un certain nombre de silicates inertes qui cristallisent à l'intérieur de la solution vitreuse qu'était le laitier fondu. Le laitier ainsi refroidi n'a aucune valeur.

Si, au contraire, on trempe brusquement le laitier fondu, ce laitier conserve l'état vitreux qu'il avait à chaud et garde, à l'état potentiel, toute l'énergie chimique qui aurait été dépensée pendant son refroidissement lent.

Il acquiert ainsi la propriété très remarquable de se combiner énergiquement et rapidement à la chaux, en présence de l'eau. Un laitier de bonne composition et bien traité donnera donc, après mouture, par simple mélange avec de la chaux, un produit hydraulique qui n'est autre que le ciment de laitier.

Il y a donc lieu, lorsqu'on cherche un laitier pour la fabrication de ciment, de se préoccuper, non seulement de sa composition chimique, mais aussi de sa granulation. On voit, d'ailleurs très fa-

cilement à la loupe ou même à l'œil, si le laitier a bien conservé son état vitreux, ce qui est, nous venons de le voir, nécessaire pour obtenir dans la suite une bonne qualité de ciment.

Dans les débuts, la fabrication du ciment de laitier s'est heurtée à quelques difficultés qui provenaient, non seulement de l'incomplète connaissance où on était des propriétés des mélanges de laitier et de chaux, mais aussi de l'imperfection des appareils de séchage et de trituration.

Le laitier est une matière poreuse qui conserve, à l'intérieur de ses pores, de grandes quantités d'eau, qu'il est assez difficile de faire partir rapidement.

Si, en effet, soumis à une température peu élevée, celle du soleil par exemple, pendant longtemps, le laitier se sèche complètement, il faut, si l'on veut obtenir sa dessiccation en un temps relativement court, élever assez la température pour que l'eau brise les grains de laitier et s'échappe.

Or, une dessiccation absolument parfaite s'impose pour la trituration. La question d'un bon séchage du laitier a été une de celles qui ont le plus préoccupé les premiers fabricants.

D'autre part, les appareils de trituration qu'on possédait il y a trente ans, étaient tous basés sur le principe du blutage des parties triturées avec retour au broyeur des parties grossières.

On conçoit que, dans ces appareils broyeurs, on ne pouvait pas triturer un mélange de laitier dur et de chaux fine ; on commençait donc par triturer le laitier tout seul, puis on opérait le mélange du laitier et de la chaux dans de grands appareils homogénéisateurs intermittents, semblables aux grands broyeurs « Alsing » qu'on emploie pour les pâtes de porcelaine. La fabrication était ainsi relativement compliquée.

Avant de vous indiquer comment elle s'est simplifiée aujourd'hui je voudrais examiner avec vous un point important, celui de la nature et de la quantité de la chaux qu'on doit mélanger au laitier pour obtenir le ciment le meilleur possible. Je vous exposerai ici des résultats inédits.

Tous les fabricants de ciment de laitier ont été amenés à faire un mélange de laitier-chaux voisin des proportions suivantes :

Laitier	2 parties
Chaux	1 —

Ils ont ainsi satisfait instinctivement à une nécessité dont ils ne se rendaient pas compte, celle d'avoir un ciment qui ne s'*évente* pas.

Vous comprenez facilement que le mélange laitier-chaux qui va faire sa prise au contact de l'eau, par la combinaison de la chaux avec la pouzzolane du laitier, deviendra complètement inerte si la chaux s'est carbonatée, car il n'existera plus lors du gâchage, à la place du mélange laitier-chaux, qu'un mélange laitier-calcaire.

On trouve des laitiers qui, absolument inertes, s'ils sont triturés seuls, donnent de très bonnes résistances triturés avec une addition infiniment petite de chaux éteinte. Mais, les ciments ainsi obtenus sont très sensibles à l'éventement et, au bout d'un mois de conservation en sacs, n'ont plus aucune valeur.

J'ai fait une série d'expériences assez complètes sur des mélanges de laitier avec des proportions de 5, 10, 15, 20, 30 0/0 de chaux, et je suis arrivé à ce résultat que pour avoir un ciment qui conserve ses propriétés plus de trois mois, il faut précisément ajouter au laitier une proportion de chaux voisine de celle de 30 0/0 que les fabricants avaient adoptées d'eux-mêmes pour répondre aux besoins de leurs clients.

Faits curieux, les mélanges de laitier avec une petite quantité de chaux sont très améliorés et rendus moins sensibles à l'éventement par des additions de *gypse*. Les résistances initiales sont aussi très augmentées.

Voir ci-contre le tableau donnant quelques essais particulièrement intéressants.

DÉSIGNATION DES ÉCHANTILLONS	DENSITÉS	FINESSE A 4.900 MAILLES	EAU DE GACHAGE	CYLINDRE	PRISE		ARRACHEMENT						ÉCRASEMENT					
							MATIÈRE PURE			MORTIER 1/3 PLASTIQUE			MATIÈRE PURE			MORTIER 1/3 PLASTIQUE		
					DÉBUT	FIN	7 jours	28 jours	84 jours	7 jours	28 jours	84 jours	7 jours	28 jours	84 jours	7 jours	28 jours	84 jours
MÉLANGES PAR TRITURATION :		0/0	0/0	m/m	heures	heures	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.
80 0/0 laitier — 15 0/0 chaux — 3 0/0 gypse, essayé de suite	0,860	4	25	0	4,00	10,40	20,00	28,75	32,50	17,87	26,62	38,62	249	379	470	201	253	400
80 0/0 laitier — 15 0/0 chaux — 3 0/0 gypse, essayé après trois mois	0,844	4	25	0	3,15	6,15	15,12	23,37	26,12	20,12	29,00	28,50	145	244	321	155	231	253
80 0/0 laitier — 15 0/0 chaux — 5 0/0 gypse, essayé de suite	0,900	3	25	0	3,55	11,10	25,25	28,37	40,83	19,87	30,83	34,62	287	407	502	225	308	419
80 0/0 laitier — 15 0/0 chaux — 5 0/0 gypse, essayé après trois mois	0,897	4	25	0	3,25	6,05	27,37	33,50	31,25	21,25	27,25	30,25	274	337	416	203	255	290
Sable de laitier de Chasse, additionné de 3 0/0 de chaux grasse éteinte	0,970	2,4	28	0	1,50	7,50	10,33	20,00	26,00	12,50	18,50	24,00	50	130	312	51	136	190
Sable de laitier de Chasse, additionné de 3 0/0 de chaux grasse éteinte et 2 0/0 de plâtre	1,020	3,0	28	0	2,15	7,45	21,00	27,33	30,33	14,00	20,50	23,50	176	343	541	76	141	165
Laitier de Givors, additionné de 3 0/0 de chaux grasse éteinte	1,025	2,9	25	0	3,05	4,15	7,00	14,66	16,00	6,00	12,50	15,75	57	121	210	38	85	138
Laitier de Givors, additionné de 3 0/0 de chaux grasse éteinte et 2 0/0 de plâtre	0,965	2,0	25	2	3,05	15,00	15,00	20,00	27,00	12,75	20,75	21,66	120	191	273	79	122	200

On peut même fabriquer un ciment de laitier presque uniquement composé de gypse et de laitier. J'ai, depuis deux ans, de pareils ciments à l'étude, et ils paraissent très bien se comporter. Y a-t-il là la matière d'un ciment nouveau? Y a-t-il là un nouvel emploi du laitier qui, mélangé au plâtre, rendrait celui-ci hydraulique? On ne peut pas encore se prononcer sur ce sujet.

Quoi qu'il en soit, il est admis que tous les fabricants, pour améliorer les résistances initiales de leurs ciments, introduisent, au moment de la trituration, une quantité inférieure à 1/100 de sels étrangers. Le capitaine Girard, dans son article de la *Revue du Génie militaire* (mai 1913, p. 408), en dit d'ailleurs un mot. Cette coutume ne présente que des avantages.

Au début de la vente du ciment de laitier on a employé ce nouveau produit un peu inconsidérément et il en est résulté pour lui une certaine défaveur non justifiée.

La combinaison du laitier avec la chaux ne se faisant qu'en présence de l'humidité, toutes les applications où le ciment de laitier était soumis à une dessiccation rapide ont donné de mauvais résultats. Autant en enduits qu'en dallages, le ciment de laitier ne saurait être employé, la surface se met en poussière, parce que la combinaison laitier-chaux n'a pas eu l'humidité suffisante pour se produire. Le ciment de laitier doit donc être proscrit pour ces emplois, mais en revanche, il est tout indiqué pour les fondations en terrains humides, pour les tunnels, et même pour les maçonneries aériennes assez épaisses pour que l'humidité se conserve suffisamment longtemps.

Vous savez que presque tous les tunnels du Métropolitain de Paris ont été faits avec du ciment de laitier, et que M. l'inspecteur général Rabut, alors qu'il était directeur du service des constructions neuves à l'ancienne Compagnie de l'Ouest, l'a employé, avec un succès complet, dans les murs de soutènement de la rue de Rome, ceux qui soutiennent, en encorbellement, le magnifique travail en ciment armé qui constitue la chaussée de cette rue.

Il est certain qu'un pareil ciment peut, sans inconvénient, être employé dans le bétonnage des forts, dans la construction des fondations de casernes, et c'est ce qui a motivé les explications que je vous donne sur lui aujourd'hui. Si j'ajoute que le ciment de laitier est bien plus résistant que le ciment Portland aux décomposi-

tions par les eaux sulfatées, vous voyez que le champ d'emploi de ce produit est assez vaste.

Y a-t-il avantage à mélanger au laitier du portland artificiel au lieu de chaux hydraulique ? Cela dépend des emplois auxquels est destiné le ciment.

Un mélange de deux parties de laitier et d'une partie de ciment Portland résista beaucoup mieux à l'effet de la sécheresse que le ciment de laitier ordinaire, parce que, et vous le comprenez facilement, le ciment Portland fait par lui-même à l'air une prise qui assure un durcissement suffisant, le laitier n'étant plus là que pour se combiner avec l'excès de chaux mise en liberté pendant la prise du ciment Portland.

Les ciments de grappier qui contiennent un excès de chaux et les chaux éminemment hydrauliques sont les produits qui se comportent le mieux en mélange avec le laitier, parce qu'on obtient avec eux et un excès de chaux qui se combine avec la pouzzolane et une prise spéciale due à la chaux hydraulique ou au ciment de grappier, qui permet l'emploi à l'air.

Mais, avec ces produits, plus qu'avec la chaux grasse, il faut, à cause de l'éventement possible, maintenir, dans le mélange, une proportion importante de chaux hydraulique ou de ciment de grappier, et le prix de revient se trouve sensiblement augmenté.

A notre usine de Vitry, nous employons, en mélange avec le laitier, le produit tout venant d'une chaux moyennement hydraulique, réalisant ainsi les avantages indiqués.

Le séchage a été simplifié de la façon suivante :

Dans un immense tube extincteur, semblable à celui que vous avez vu ici, mais de diamètre plus grand (diamètre $3^{m},50$, longueur 16 mètres), le laitier est mélangé avec la chaux en roche sortant des fours préalablement concassée ; l'eau du laitier se fixe alors sur la chaux en élevant la température, qu'un foyer extérieur permet d'ailleurs de maintenir, au moment des arrêts, ou de retrouver le lundi matin, et le séchage du laitier s'opère en même temps que l'extinction de la chaux.

On ajoute un peu de vapeur d'eau, ou d'eau, si cela est nécessaire, puis le mélange est conduit aux moulins à boulets et aux broyeurs. Enfin, après ces opérations, un autre extincteur, dont on se sert très rarement d'ailleurs, permet d'éteindre la chaux vive

restant dans le ciment, si, pour une raison ou pour une autre, la première extinction avait été incomplète.

Vous voyez que la fabrication du ciment de laitier s'est assez sensiblement simplifiée; à des opérations successives et intermittentes a succédé une marche continue et les matières entrant en tête à l'extincteur sortent, sans aucune manœuvre inutile, prêtes à être mise en silos ou en sacs.

Dans l'article dont je vous ai parlé, le capitaine Girard se plaint que le laitier, dans beaucoup d'usines, sert à la falsification du ciment Portland. Il dit que bien souvent, au début de la mouture, on aperçoit, dans les usines à ciment artificiel, des tas suspects qui servent à augmenter plus ou moins, par un mélange clandestin, la fabrication de l'usine.

C'est, évidemment, une pratique peu loyale : mais il semble qu'il serait facile de trouver des essais permettant de déceler cette addition, si l'on voulait être absolument sûr de ne recevoir que du ciment Portland sans aucun mélange de laitier.

En particulier, en agitant quelques grammes de ciment dans de l'eau et en laissant, s'il le faut, le flacon pendant quelque temps à l'étuve à une température de 60°, par exemple, il doit être très facile de déceler la présence du laitier dans un ciment.

En effet, si on a affaire à du ciment pur, la chaux du ciment doit se dissoudre dans l'eau ; si, au contraire, il y a une addition importante de laitier, cette chaux doit se combiner avec le laitier et ne pas apparaître dans la solution.

Je pense qu'il y a là un petit procédé dont la mise au point serait facile et si je l'indique, en passant, c'est simplement pour vous faire voir qu'une administration peut toujours se défendre et obtenir les produits qu'elle désire en prescrivant simplement des essais simples et sans entrer dans le mode de fabrication ni envoyer des surveillants dans les usines, ce qui est, dans beaucoup de cas, au moins, une mesure illusoire, et dans tous une mesure gênante pour les fabricants qui tiennent à conserver pour eux leurs perfectionnements.

En terminant son article, très bien fait d'ailleurs, le capitaine Girard parle des *chaux-laitier*. Il en parle avec une certaine méfiance.

Vous savez qne les chaux-laitier sont purement et simplement

des chaux plus ou moins hydrauliques triturées, auxquelles on a ajouté 10 ou 20 0/0 de laitier, plus ou moins finement trituré.

Je crois que les réserves du capitaine Girard sont exagérées. Outre que mes essais ont toujours montré les bonnes qualités de notre *chaux-laitier* de Vitry, j'ai fait ici quelques expériences sur l'addition d'une petite quantité d'argile deshydratée c'est-à-dire de pouzzolane, à nos chaux de Lafarge.

Une simple addition de 10 0/0 a fait passer les résistances de nos chaux triturées de 5 kilogrammes en mortier à 7 jours à 11 kilogrammes et de 10 kilogrammes en mortier à 28 jours à 21 kilogrammes. L'écrasement, en mortier, à 28 jours, passe de 118 à 194 kilogrammes.

Les additions de 16 et de 20 0/0 n'ont pas plus d'effet, et même avec 24 0/0 il y a très peu de différence.

Il doit donc, je pense, être admis que l'addition à des chaux moyennes de quantités relativement faibles de bonnes pouzzolanes, améliore considérablement celles-ci et en font de tout à fait bons produits.

La chaux-laitier aura donc sa place dans la construction des casernes, comme le ciment de laitier dans le bétonnage des forts, les tunnels et les fondations.

V. — Je dois maintenant, Messieurs, vous donner aujourd'hui ma manière de voir sur les moyens les plus simples, que vous pouvez employer, pour juger de la qualité d'une chaux sur le chantier.

La question des essais rapides sur le chantier a été traitée dans la *Revue du Génie militaire* par le capitaine Girard (mai 1911, p. 323). Je vous renvoie à cet article très documenté et je pense, avec le capitaine Girard, qu'on peut, sans installation, sur un chantier, sinon juger de la qualité exacte du produit qui est fourni, du moins sûrement éliminer les produits nettement mauvais.

Il y a longtemps que M. Le Chatelier a fait remarquer que l'essai de prise avec l'aiguille Vicat n'était pas plus précis que l'essai de prise au pouce. Ce dernier mode d'opérer a d'ailleurs l'avantage de permettre d'étudier la prise des mortiers, ce que ne permet pas l'emploi de l'appareil Vicat.

Pour faire un essai de prise au pouce, on étend, sur une plaque de verre, une galette de 2 centimètres d'épaisseur. On considère

que la prise est terminée lorsque le pouce cesse de marquer sous une presion normale et sans excès.

Il arrive, probablement parce que les gens les plus forts ont les pouces plus gros, que l'erreur d'un observateur à l'autre est insignifiante, ou du moins, tout à fait admisssible.

Si la chaux qu'on étudie est d'une prise très lente, il pourrait être difficile d'immerger une galette qui se délaverait ; on a alors avantage à remplir de pâte, un verre qu'on immerge, en ayant soin de couvrir la surface d'une plaque de verre pour éviter le délavage.

Il faut écarter, comme chaux non hydraulique, toutes les chaux qui n'ont pas fait complètement prise sous l'eau au bout de 72 heures.

Il sera intéressant de posséder de la toile 50 et de la toile 80 (1). On refuserait, naturellement, toute chaux qui donnerait un résidu important au tamis 50, le résidu à 80 sera examiné à la loupe et on distinguera facilement s'il est composé d'incuits ou de parties très cuites. On aura ainsi une indication de la cuisson de la chaux.

Si l'on avait des doutes, on pourrait mettre ce résidu dans un verre de montre et on attaquerait avec un acide dilué, ou du vinaigre, pour voir s'il donne des bulles de CO^2.

La mesure de la densité paraît tout à fait inutile, non seulement la densité est variable suivant les circonstances extérieures ; mais, contrairement à ce que croient encore beaucoup de personnes, les produits à faible densité ne permettent pas de diminution de dosage. La variable qui entre dans la mesure de la compacité d'un mortier, c'est-à-dire dans la mesure de ses vides, est le poids spécifique, lequel dépend de la composition chimique et est d'autant plus faible que le produit contient plus de silice et de chaux.

Du reste, la quantité d'eau nécessaire pour le gâchage donnera une idée très nette de la densité, laquelle est fonction de la dimension linéaire des grains, absolument comme l'eau de gâchage est fonction de leur surface.

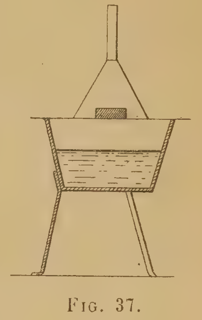
Il est, naturellement, de toute nécessité de s'assurer de l'invariabilité de volume du produit employé.

(1) On peut même se passer de toiles 50 et 80, séparer le résidu de toute autre manière (par secousses répétées dans le couvercle d'une boite, par ventilation, etc...).

Le capitaine Girard préconise l'essai dans l'eau chaude à 50°. Je ne partage pas son avis, la température de 50° étant difficile à maintenir.

Il n'y a aucun inconvénient à employer la température de 100°. Pour diminuer la sévérité de l'essai, il n'y aurait qu'à immerger les éprouvettes dans l'eau bouillante, non pas vingt-quatre heures après la fin bien constatée de la prise, mais quatre jours, par exemple, après cette fin bien constatée.

On peut d'ailleurs remplacer l'essai à l'eau bouillante par l'essai de galettes comprimées à la vapeur d'eau. Une marmite, une toile métallique et un entonnoir seront tous les appareils nécessaires. La poudre de chaux est gâchée avec environ les 2/3 de l'eau nécessaire à sa consistance normale, agglomérée par pression dans le moule, puis placée, comme l'indique la figure 37, sous l'entonnoir et au-dessus de l'eau bouillante.


Fig. 37.

Comme il y a des rentrées d'air sous l'entonnoir, la galette est ainsi soumise à l'action d'un mélange d'air et de vapeur à 75 ou 80°; on n'a pas besoin d'attendre la fin de la prise pour faire l'essai et, deux heures après la fabrication de l'éprouvette, on est renseigné sur le gonflement linéaire qui se produit, lequel peut se mesurer avec un double décimètre.

Enfin, rien n'est plus facile que d'avoir une idée de la résistance du mortier qu'on va employer. Il suffit de faire adhérer une brique contre un mur, avec le mortier qu'on veut essayer, on laisse durcir le mortier un certain nombre de jours, puis on charge la brique jusqu'à ce qu'elle se détache du mur et on a ainsi, une valeur, non de la résistance du mortier, mais de son adhérence.

Mais, si l'on remarque que les essais de traction en mortier, ne mesurent, en fait, que l'adhérence des produits hydrauliques aux grains de sable, il y a lieu de penser qu'on peut tirer de cet essai très simple des indications suffisantes.

VI. — Enfin, Messieurs, il me reste un mot à vous dire de ce que vous pouvez faire dans les colonies, avec des moyens rudimentaires, pour fabriquer des produits utilisables.

Il est assez facile, avec des moyens simples, de se rendre compte approximativement de la valeur d'un calcaire. En mettant dans un

litre 100 grammes de pierre triturée grossièrement, à la grosseur maximum d'un grain de riz, par exemple, et en remplissant le litre avec de l'acide chlorhydrique de densité 1, 19 ou 1, 20, étendu de son poids d'eau, vous êtes sûrs, en agitant de temps en temps, de chasser complètement l'acide carbonique du calcaire. Le poids du litre, avant et après, sur une balance sensible au gramme qu'on peut construire soi-même, avec la plus grande facilité, donnera, avec une approximation très suffisante, la teneur du calcaire en carbonate de chaux.

Cet essai pourra être utilement complété par une attaque de la surface du calcaire avec de l'acide chlorhydrique dilué à 10 0/0 qui vous montrera les grosses inclusions de carbonate de chaux, au milieu du résidu.

Enfin, en filtrant et en séchant le résidu obtenu, dans la première opération, puis en le portant aux environs de 500° sur le feu d'une forge légèrement soufflée, on le verra ou conserver sa couleur ou prendre une teinte rose. La couleur rose qu'il prendra sera un indice de la teneur en fer qu'il contient et comme la teneur en fer augmente toujours avec la teneur en alumine, on aura, non seulement une idée très juste de la teneur du calcaire en résidu argileux, mais encore une idée approximative de la teneur de ce résidu argileux en alumine et en fer ce qui, joint à l'essai d'homogénéité à l'acide dilué, permettra de se faire une idée très suffisante des pierres à choisir pour obtenir un bon produit.

Malheureusemement, une fois ce choix fait, je ne vois pas très bien comment on obtiendra la cuisson des pierres.

Le fait que je vous suppose, ainsi dénué de tout moyen d'action et réduit à des procédés aussi simples pour faire un choix, prouve que j'ai admis que vous faisiez des travaux dans des pays assez perdus pour n'avoir pas de charbon à votre disposition.

Il faudrait donc cuire au bois et, dans ces conditions, vous arriverez à peine à la température de décarbonatation, sans avoir réalisé aucune combinaison utile du résidu argileux avec la chaux.

Peut-être pourriez-vous, si vous aviez à votre disposition des bois très durs, obtenir du charbon de bois assez compact pour faire une cuisson au charbon, mais il resterait la difficulté de construire votre four dans un pays, où les briques réfractaires ne doivent pas pénétrer plus facilement que le charbon.

Mais si, dans ces conditions, je ne vois pas les moyens de faire directement un produit hydraulique convenable, vous aurez toujours à votre disposition la possibilité de fabriquer une pouzzolane au moyen d'argile, plus ou moins bien déshydratée.

Il est, en effet, probable que les travaux que vous ferez seront proches des vallées et que l'argile ne vous manquera pas.

J'ai dit l'an dernier et j'ai expliqué à vos prédécesseurs, que l'argile peu cuite, vers 700° seulement, devient une pouzzolane très active, en perdant son eau d'hydratation.

Vous avez vu, quand je vous ai parlé des ciments de laitier, que de faibles quantités de cette argile mélangée à des chaux, amélioraient considérablement leurs résistances. Le moyen le plus simple sera donc pour vous de fabriquer un sable de briques, en cuisant au bois, dans des fours de campagne, à la température la moins élevée possible, des briques faites avec la meilleure argile que vous aurez à votre disposition.

La trituration de ces briques sous une meule recevant son mouvement d'un manège mû par un cheval, vous donnera un sable grossier qui, mélangé avec la chaux, que vous obtiendrez par cuisson au bois des calcaires que vous aurez trouvés, vous permettra d'obtenir un mortier durcissant parfaitement sous l'eau; les parties peu cuites de l'argile servant de pouzzolane, les parties les plus cuites de sable dur.

J'ai eu, au début de ma carrière, dans la République Argentine, à construire, avec de la chaux faiblement cuite, les fondations d'un pont que nous faisions alors à sec et qui naturellement, à certains moments, étaient sous l'eau.

J'ai employé les moyens que je viens de vous indiquer, les piles étaient à peine sorties de terre qu'une inondation venait immerger les parties en fondation et les parties déjà en élévation pendant plus d'un mois. Quand l'eau s'est retirée j'ai constaté, avec plaisir, que mon mortier avait parfaitement durci.

Rendons à César ce qui appartient à César. Certains anciens bordereaux du service du Génie comportaient encore, il y a quelques années, l'emploi des ciments de tuileau. Le ciment était obtenu en broyant des tuiles ou des briques de rebut ou usagées, qu'on mélangeait à la chaux.

C'est ce ciment de tuileau, mais fabriqué d'une façon plus par-

faite, que je vous recommande tout particulièrement pour vos travaux des colonies.

Je suis persuadé que tous ceux qui auront pris les précautions nécessaires se féliciteront du résultat.

VI. — Cet exemple vous prouvera que les industriels et les administrations n'ont qu'à gagner à des contacts plus fréquents.

J'ai élevé quelques critiques, au début, sur la façon dont les administrations comprenaient leur cahier des charges et maintenant, je retrouve dans les vieux documents de ces administrations un procédé de tous points recommandable et que je me fais un plaisir de vous recommander ici, comme le meilleur à employer dans des cas déterminés.

C'est pour multiplier ces utiles contacts qu'on organise vos tournées de visites d'usines et j'éprouve un réel plaisir à vous dire, en terminant, combien nous sommes heureux de vous recevoir tous les ans, de vous ouvrir toutes grandes les portes de nos usines et combien je me sens honoré de prendre, à chacune de ces visites, la parole devant vous.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE PREMIER

Pages.

RECHERCHES SUR LA CONSTITUTION INTIME DES CALCAIRES ET DES ARGILES 3

CHAPITRE II

RECHERCHES SUR LA CONSTITUTION INTIME DES LIANTS HYDRAULIQUES ET SUR LEURS PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES 17

§ 1. — Combinaison de la silice et de la chaux à basse température........... 17
§ 2. — Constitution des ciments Portland.. 20
§ 3. — Extinction de la chaux vive existant après cuisson dans les chaux et ciments.. 23

CHAPITRE III

RECHERCHES SUR LES DÉCOMPOSITIONS DES MORTIERS PAR LES EAUX SULFATÉES ET MOYENS D'Y REMÉDIER 31

§ 1. — Communication de 1902 à l'Association Internationale pour l'essai des matériaux.. 32
I. Tunnel d'Alicun sur la ligne de Linarès à Alméria en Espagne (1900). 32
II. Souterrains de Rimont et de la Plagnotte........................ 34
Décomposition dans le Sud Algérien........................ 38
§ 2. — Expériences sur la décomposition des mortiers par les eaux sulfatées... 41
I. Action du sulfate de chaux........................ 43
II. Action du sulfate de magnésie........................ 49
III. Action de l'eau de mer........................ 56

CHAPITRE IV

RECHERCHES SUR LA PRISE ET LE DURCISSEMENT DES CIMENTS 61

§ 1. — Généralités. Dosage de la chaux mise en liberté par les réactions des durcissements........................ 61
§ 2. — Action de divers produits sur la prise et le durcissement............... 63
A. — Produits agissant à doses infinitésimales........................ 63
B. — Produits agissant à doses élevées........................ 65
§ 3. — Action du gypse sur les laitiers........................ 67

CHAPITRE V

Pages.

RECHERCHES SUR CERTAINES PROPRIÉTÉS DES CIMENTS OU MORTIERS MIS EN ŒUVRE 73

§ 1. — Imperméabilisation des mortiers 73
A. — Matières pulvérulentes 74
B. — Matières grasses colloïdales 77
§ 2. — Retrait 81
A. — Influence du milieu d'exposition 84
B. — Influence des mélanges 88
§ 3. — Allure hyperbolique de la courbe de durcissement des mortiers hydrauliques 95

CHAPITRE VI

RECHERCHES SUR LES PROCÉDÉS D'ESSAI DES LIANTS HYDRAULIQUES 103

§ 1. — Essais relatifs à la constance de volume des ciments 103
§ 2. — Essais mécaniques normaux 115
A. — Comparaison des mortiers battus et plastiques 115
Mortier 1/3 battu 116
Mortier 1/3 plastique 116
Résumé 116
B. — Comparaison entre gâcheurs différents gâchant le même produit .. 118
§ 3. — Recherches de méthodes nouvelles 137
I. — Méthode de la bille de Brinell 137
II. — Essais à l'écrasement 152

CHAPITRE VII

CIMENT ALUMINEUX 157

I. — Constitution intime du ciment alumineux 158
II. — Propriétés des ciments alumineux 160
Prise et durcissement 160
Retrait 161
Résistances 161
Action des eaux sulfatées 164

CHAPITRE VIII

ANNEXES 167

Conférence faite le 7 juillet 1911 aux Élèves de l'École du Génie militaire 167
I. — Constitution chimique des chaux et ciments 167
1° Silicates de chaux 167
2° Aluminates 169
3° Silico-aluminates de chaux 170
II. — Étude des calcaires 173
III. — Prise et durcissement 174
IV. — Extinction des chaux et ciments 177
V. — Emploi des chaux et ciments en mortier. Adhérence 178
VI. — Retrait des ciments ; influence sur le béton armé 179

Pages.
VII. — Décompositions. Ciments fondus. Pouzzolanes. Carbonatation.... 181
VIII. — Essais de laboratoire.......... 184
Poids spécifique.......... 184
Finesse.......... 184
Densité apparente.......... 184
Essais à l'eau chaude.......... 185
Essai de prise.......... 185
Essai de résistances.......... 185
Conférence faite le 26 juin 1912 aux Élèves de l'École d'application de l'Artillerie et du Génie de Fontainebleau.......... 188
Conférence faite le 29 juillet 1913 aux Élèves de l'École militaire du Génie de Versailles.......... 202
Table des matières.......... 225

TOURS. — IMPRIMERIE RENÉ ET PAUL DESLIS. — 12-4-1926.



TOURS. — IMPRIMERIE RENÉ ET PAUL DESLIS.